



Departamento de Física

**Concepção de um instrumento de medição
não invasivo, para determinação das curvaturas e
desvios laterais da coluna vertebral**

Filipe Oliveira dos Santos

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Orientador:

Prof. Doutor Mário Forjaz Secca

LISBOA

2009

Agradecimentos

A execução desta tese de dissertação e respectivo trabalho não teriam sido possíveis sem o apoio de muitas pessoas, a quem eu estou extremamente grato.

Mais concretamente, quero agradecer:

- ao meu Orientador, o **Professor Doutor Mário Forjaz Secca**, por todo o apoio, disponibilidade e orientação ao longo deste projecto.
- à **Dra. Cláudia Quaresma**, pela colaboração, apoio e partilha de material.
- ao **Departamento de Física da FCT-UNL** e ao **CEFITEC** pelo apoio e financiamento do projecto.

Também quero agradecer à empresa Eurofral e aos Engenheiros Daniel, Filipe e Hugo pelo apoio, partilha de meios e conhecimentos. Ainda, um agradecimento especial ainda para o “Mestre” Valério pela paciência e conhecimentos técnicos transmitidos. Obrigado também a todas as pessoas da Eurofral.

Quero agradecer às empresas IGUS, EQUINOTEC e ACRILFER pelo apoio e sugestões

Um agradecimento muito especial também aos meus pais que sempre me apoiaram pacientemente e à minha irmã. Também para toda a minha família, em particular para o meu Avô, à minha Avó e o meu Padrinho.

Não posso deixar os meus colegas Engenheiros Biomédicos de lado, obrigado pela camaradagem ao longo destes anos.

Também não posso esquecer todos os meus amigos capoeiristas que sempre me deram força. Axé!

Um obrigado também aos meus outros amigos que ainda não referi. Obrigado Pedro Escudeiro e Isabel.

Por fim, quero agradecer por tudo, a ti, Andrea! (“Sem ti, todos os dias são iguais!” Aguardela)

Resumo

A presente tese de dissertação tem como objectivo a concepção de um instrumento de medição não invasivo, que quantifique as curvaturas e desvios laterais da coluna vertebral de mulheres ao longo do período gestacional. Mais concretamente, o objectivo do instrumento é a medição da posição tridimensional de pontos marcados na superfície posterior do tronco de mulheres grávidas sem provocar qualquer interacção com o interior do seu corpo. Estes pontos correspondem à posição mais posterior da estrutura mais posterior de cada vértebra da coluna vertebral, nomeadamente, a apófise espinhosa. A sua marcação é previamente efectuada por palpação, realizada por um profissional de saúde especializado. São marcados vinte e cinco pontos, correspondendo às apófises espinhosas de 25 vértebras, desde a primeira vértebra sagrada até à primeira vértebra cervical.

O projecto de concepção de um instrumento de medição baseia-se em técnicas de medição de coordenadas, nomeadamente coordenadas cartesianas. O instrumento é composto por uma estrutura vertical apoiada numa plataforma horizontal, na qual a mulher grávida se posiciona. Na região superior da estrutura vertical existem 25 estruturas denominadas de unidades de medição. Cada unidade de contacto determina a posição de um ponto marcado, através de uma sonda de que contacta este último. A sonda desloca-se translacionalmente em cada um dos três eixos do sistema cartesiano.

Ao longo do projecto de concepção são desenvolvidos todos os mecanismos e elementos associados ao instrumento. Posteriormente, é construído um protótipo físico, o qual é avaliado, através de um processo de validação. Este consiste na comparação entre as coordenadas de pontos com posições pré-definidas e as coordenadas desses mesmos pontos medidas pelo protótipo em questão.

Abstract

The purpose of this thesis is the design of a non-invasive measuring device to quantify the spinal curves of women during pregnancy. More specifically, the objective of this device is to measure the tridimensional position of dots marked on the posterior surface of the upper body from pregnant women without interacting with the interior of their body. Each dot represents the most posterior position from the most posterior anatomical process of each vertebra that forms the spine – the spinous process. The marking is previously made by a specialized health professional through palpation. In total, there are twenty five marked points matching the spinous process of twenty five vertebrae, from the first sacral vertebra to the first cervical vertebra.

The design of the measuring device is inspired on coordinate measuring techniques, more properly Cartesian coordinates. The device is formed by a vertical structure supported over a horizontal platform, where the pregnant woman stands. On the upper region of the vertical structure there are 25 pieces called measuring units. Each measuring unit quantifies the position of one marked point, throw a probe, which contacts the associated marked point. The probe moves along each one the three axes that compose the Cartesian coordinate system.

All mechanisms and elements regarding the device are developed during its design. Latter on, it is build a physical prototype, which is analyzed by a validation process. This process compares the Cartesian coordinates of pre-defined points with the coordinates of those same points measured by the prototype.

Simbologia e Notações

d_{CH} : Comprimento total da cremalheira horizontal da estrutura de calibração

d_L : Distância pretendida (de leitura)

d_{L-L} : Distância entre as duas cantoneiras

d_P : Distância desde a extremidade posterior da cremalheira horizontal e a cantoneira horizontal posterior graduada da unidade de contacto

P_{DI} : Par de pontos do vértice inferior direito

P_{DS} : Par de pontos do vértice superior direito

P_{EI} : Par de pontos do vértice inferior esquerdo

P_{ES} : Par de pontos do vértice superior esquerdo

PMMA : Polimetilmetacrilato

POM : Polioximetileno

V_{ADI} : Vértice anterior direito da placa inferior

X_{DI} : Coordenada X (no plano YOZ da estrutura de calibração) associada ao par de pontos P_{DI}

X_I : Distância (para a coordenada X) entre a extremidade anterior e inferior das placas do sistema de suporte até à extremidade posterior e inferior do plano XOZ da estrutura de calibração

X_L : Valor lido no instrumento (equivalente) à coordenada X

$X_{E\ XOZ}$: Valor esperado para a coordenada X para o plano XOZ

$X_{E\ YOZ}$: Valor esperado para a coordenada X para o plano YOZ

$X_{M\ XOZ}$: Valor medido para a coordenada X para o plano XOZ

$X_{M\ YOZ}$: Valor medido para a coordenada X para o plano YOZ

X_P : Valor de referência na estrutura de calibração para a coordenada X

Y_{DI} : Coordenada Y (no plano YOZ da estrutura de calibração) associada ao par de pontos P_{DI}

Y_L : Valor lido no instrumento (equivalente) à coordenada Y

$Y_{E\ XOZ}$: Valor esperado para a coordenada Y para o plano XOZ

$Y_{E\ YOZ}$: Valor esperado para a coordenada Y para o plano YOZ

$Y_{M\ XOZ}$: Valor medido para a coordenada Y para o plano XOZ

$Y_{M\ YOZ}$: Valor medido para a coordenada Y para o plano YOZ

Y_P : Valor de referência na estrutura de calibração para a coordenada Y

Z_{DI} : Coordenada Z (no plano YOZ da estrutura de calibração) associada ao par de pontos P_{DI}

Z_I : Distância (para a coordenada Z) entre a extremidade anterior e inferior das placas do sistema de suporte até à extremidade posterior e inferior do plano XOZ da estrutura de calibração

Z_L : Valor lido no instrumento (equivalente) à coordenada Z

$Z_{E\ XOZ}$: Valor esperado para a coordenada Z para o plano XOZ

$Z_{E\ YOZ}$: Valor esperado para a coordenada Z para o plano YOZ

$Z_{M\ XOZ}$: Valor medido para a coordenada Z para o plano XOZ

$Z_{M\ YOZ}$: Valor medido para a coordenada Z para o plano YOZ

Z_P : Valor de referência na estrutura de calibração para a coordenada Z

ΔX_{XOZ} : Correção da coordenada X da posição do alfinete no plano XOZ

ΔY_{XOZ} : Correção da coordenada Y da posição do alfinete no plano XOZ

ΔZ_{PMXOZ} : Correção da coordenada Z relativamente ao plano XOZ derivado da recta de correcção da escala de papel milimétrico

ΔZ_{PMYOZ} : Correção da coordenada Z relativamente ao plano YOZ derivado da recta de correcção da escala de papel milimétrico

ΔZ_{XOZ} : Correção da coordenada Z da posição do alfinete no plano XOZ

Índice

| | |
|---|-------------|
| AGRADECIMENTOS..... | III |
| RESUMO | IV |
| ABSTRACT..... | V |
| SIMBOLOGIA E NOTAÇÕES | VI |
| ÍNDICE | VIII |
| ÍNDICE DE IMAGENS | XI |
| ÍNDICE DE TABELAS | XII |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 ENQUADRAMENTO..... | 1 |
| 1.2 OBJECTIVOS..... | 2 |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 2 |
| 2. EXPOSIÇÃO TEÓRICA..... | 4 |
| 2.1 ALTERAÇÕES DA MULHER DURANTE A GESTAÇÃO..... | 4 |
| 2.2 A ESTRUTURA MÚSCULO-ESQUELÉTICA HUMANA..... | 7 |
| 2.3 DEFINIÇÃO DE UMA NECESSIDADE | 9 |
| 3. INSTRUMENTOS..... | 11 |
| 3.1 DEFINIÇÃO DE INSTRUMENTO | 11 |
| 3.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO TÍPICAS EM AMBIENTE CLÍNICO | 12 |
| 3.3 TÉCNICAS ALTERNATIVAS: NÃO INVASIVAS..... | 13 |
| 3.3.1 <i>Instrumentos médicos não invasivos.....</i> | <i>13</i> |
| 3.3.2 <i>Técnicas de mapeamento</i> | <i>14</i> |
| 3.4 INSTRUMENTO MECÂNICO | 19 |
| 3.5 NOVO INSTRUMENTO | 21 |
| 3.6 PRINCÍPIOS DE CONCEPÇÃO E DE DESIGN..... | 22 |
| 4. PROJECTO DE CONCEPÇÃO..... | 24 |
| 4.1 RECONHECIMENTO DUMA NECESSIDADE..... | 24 |
| 4.2 DEFINIÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES, REQUISITOS E EXIGÊNCIAS..... | 24 |
| 4.3 CRIAÇÃO DE IDEIAS PARA A CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO | 26 |
| 4.3.1 <i>A Teoria de Sistemas.....</i> | <i>26</i> |
| 4.3.2 <i>Os sistemas base do instrumento</i> | <i>27</i> |
| 4.3.3 <i>Conceitos associados aos sistemas base da concepção do instrumento</i> | <i>28</i> |
| 4.3.3.1 Sistema de Contacto | 28 |
| 4.3.3.2 Sistema de controlo | 28 |
| 4.3.3.3 Sistema de medição..... | 29 |
| 4.3.3.4 Sistema de suporte | 29 |
| 4.3.3.5 Sistema de posicionamento | 30 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.4 | AVALIAÇÃO DOS CONCEITOS APRESENTADOS | 30 |
| 4.4.1 | <i>Sistema de contacto</i> | 30 |
| 4.4.2 | <i>Sistema de controlo</i> | 30 |
| 4.4.3 | <i>Sistema de medição</i> | 31 |
| 4.4.4 | <i>Sistema de suporte</i> | 31 |
| 4.4.5 | <i>Sistema de posicionamento</i> | 31 |
| 4.5 | DESENVOLVIMENTO E OPTIMIZAÇÃO DETALHADOS DO INSTRUMENTO | 32 |
| 4.5.1 | <i>Sequência dos 3 eixos</i> | 33 |
| 4.5.2 | <i>As unidades de contacto</i> | 34 |
| 4.5.2.1 | Os sistemas das unidades de contacto | 34 |
| 4.5.2.4 | Resumo dos sistemas seleccionados | 35 |
| 4.5.2.5 | Estrutura da unidade de contacto | 36 |
| 4.5.2.5.1 | Nível Z | 36 |
| 4.5.2.5.2 | Nível Y | 37 |
| 4.5.2.5.3 | Nível X | 37 |
| 4.5.3 | <i>Conceitos do sistema base ainda não definido – o sistema de suporte</i> | 37 |
| 4.5.4 | <i>Parâmetros detalhados do instrumento</i> | 38 |
| 4.5.4.1.1 | Sistema de tracção do eixo Z | 38 |
| 4.5.4.1.2 | Sistema de guiamento do eixo Z | 40 |
| 4.5.4.1.3 | Sistema de travagem do eixo Z | 40 |
| 4.5.4.1.4 | Sistema de medição do eixo Z | 41 |
| 4.5.4.1.5 | Sistema de tracção do eixo Y | 41 |
| 4.5.4.1.6 | Sistema de guiamento do eixo Y | 42 |
| 4.5.4.1.7 | Sistema de travagem do eixo Y | 43 |
| 4.5.4.1.8 | Sistema de medição do eixo Y | 43 |
| 4.5.4.1.9 | Sistema de tracção do eixo X | 44 |
| 4.5.4.1.10 | Sistema de guiamento do eixo X | 44 |
| 4.5.4.1.11 | Sistema de travagem do eixo X | 45 |
| 4.5.4.1.12 | Sistema de medição do eixo X | 45 |
| 4.5.4.2.13 | Material dos níveis da unidade de contacto | 46 |
| 4.5.4.2 | Sistema de contacto – sonda | 47 |
| 4.5.4.3 | Sistema de suporte | 47 |
| 4.5.4.4 | Sistema de posicionamento | 49 |
| 5. | VALIDAÇÃO DO INSTRUMENTO | 51 |
| 5.1 | CONSTRUÇÃO DO MODELO FÍSICO – O PROTÓTIPO | 51 |
| 5.2 | PONTOS DE REFERÊNCIA | 51 |
| 5.3 | ESTRUTURA DE CALIBRAÇÃO | 53 |
| 5.4 | PROCESSO DE MEDIÇÃO | 54 |
| 5.4.1 | <i>Posicionamento relativo (pares de pontos)</i> | 55 |
| 5.4.2 | <i>Marcação dos pontos</i> | 55 |
| 5.4.3 | <i>Processo de medição</i> | 56 |
| 5.5 | ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS | 56 |
| 5.5.1 | <i>Valores medidos com a estrutura de calibração</i> | 56 |
| 5.5.2 | <i>Tratamento estatístico das medições efectuadas</i> | 56 |
| 5.5.2.1 | Valores esperados | 59 |
| 5.5.2.2 | Valores medidos | 59 |
| 5.5.2.3 | Conjunto dos erros da medição | 62 |
| 5.5.2.4 | Análise dos dados obtidos | 64 |
| 5.5.2.4 | A incerteza associada ao processo de validação | 65 |
| 6. | DISCUSSÃO | 67 |
| 7. | CONCLUSÃO | 71 |
| 8. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 72 |

APÊNDICE I FABRICO DO PROTÓTIPO77

| | |
|---|----|
| I.1 TABELA 015 – LISTAGEM DOS ELEMENTOS E ESTRUTURAS DO PROTÓTIPO FABRICADO | 77 |
| I.2 CUSTOS ASSOCIADOS À CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO..... | 80 |

APÊNDICE II VALIDAÇÃO81

| | |
|--|-----|
| II.1 ESTRUTURA DE CALIBRAÇÃO..... | 81 |
| II.1.1 <i>Definição de uma necessidade</i> | 81 |
| II.1.2 <i>Requisitos e especificações</i> | 81 |
| II.1.3 <i>Conceito inicial</i> | 81 |
| II.1.4 <i>Análise dos conceitos</i> | 82 |
| II.1.5 <i>Desenvolvimento do conceito</i> | 83 |
| II.1.5.1 Escala..... | 84 |
| II.1.5.2 Marcação dos pontos..... | 85 |
| II.1.6 <i>Avaliação dos conceitos desenvolvidos</i> | 86 |
| II.1.6.1 Validação da escala do papel milimétrico | 86 |
| II.2 ANÁLISE DA POSIÇÃO DOS ALFINETES..... | 91 |
| II.2.1 <i>Posição dos alfinetes no plano XOZ</i> | 91 |
| II.2.2 <i>Demonstração dos cálculos associados à correcção de cada coordenada do ponto de contacto de cada alfinete com o protótipo.</i> | 94 |
| II.3 ALINHAMENTO DA ESTRUTURA DE CALIBRAÇÃO COM O PROTÓTIPO DO INSTRUMENTO..... | 97 |
| II.3.1 <i>Plano YOZ</i> | 97 |
| II.3.2 <i>Plano XOZ</i> | 98 |
| II.4 – VALORES MEDIDOS DOS PONTOS MARCADOS NA ESTRUTURA DE CALIBRAÇÃO..... | 101 |
| II.4 – PROCEDIMENTO PARA A MEDIÇÃO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA | 105 |

APÊNDICE III TESTES E CÁLCULOS.....106

| | |
|--|-----|
| III.1 ENSAIO RELATIVO AO GUIAMENTO DA MÉTRICA VERTEBRAL NO EIXO Z..... | 106 |
| III.2 – A FOLGA DO SISTEMA DE GUIAMENTO DO EIXO Y E A MEDIÇÃO..... | 114 |
| III.3 ADEQUAÇÃO DA ENGRENAGEM DO SISTEMA DE TRACÇÃO DO EIXO Z..... | 116 |
| III.4 ESTABILIDADE DOS VEIOS DO SISTEMA DE GUIAMENTO DO EIXO Z | 118 |

APÊNDICE IV ELEMENTOS ASSOCIADOS AOS SISTEMAS DA UNIDADE DE CONTACTO121

| | |
|----------------------------------|-----|
| IV.1 SISTEMAS DE TRACÇÃO | 121 |
| IV.2 SISTEMAS DE GUIAMENTO | 121 |
| IV.3 SISTEMA DE TRAVAGEM | 122 |
| IV.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO..... | 123 |

APÊNDICE V – PEDIDO DE PATENTE (JUNHO DE 2008)124

| | |
|---|-----|
| V.1 DESENHO DO PROTÓTIPO FABRICADO (SEGUNDO O PEDIDO DE PATENTE SUBMETIDO)..... | 124 |
| V.2 – FIGURAS E DESCRIÇÃO DO INSTRUMENTO (SEGUNDO O PEDIDO DE PATENTE) | 124 |

Índice de Imagens

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – A coluna vertebral [30] | 8 |
| Figura 3.1 – Dados adquiridos por uma técnica de luz estruturada (esquerda) [47] | 17 |
| Figura 3.2 – As diferentes técnicas de perfilometria..... | 18 |
| Figura 3.3 – Faro® Gage [49] | 19 |
| Figura 3.4 – Etapas do projecto de concepção [37] | 22 |
| Figura 4.1 – Sistemas do instrumento..... | 27 |
| Figura 4.2 – Conceitos de Máquinas de medição de coordenadas [58] | 28 |
| Figura 4.3 - Posicionamento relativo do instrumento..... | 32 |
| Figura 4.4 - A Unidade de contacto | 34 |
| Figura 4.5 – Estrutura da unidade de contacto..... | 36 |
| Figura 4.6 - Pinhão vertical | 38 |
| Figura 4.7 – Pinhão Vertical (1), eixo (3) e fixação (2, 4 , 5 , 6) | 38 |
| Figura 4.8 - Veios verticais | 40 |
| Figura 4.9 – Parafuso do travão do nível Z..... | 40 |
| Figura 4.10 - Calço do travão do nível Z..... | 40 |
| Figura 4.11 - Régua graduada vertical..... | 41 |
| Figura 4.12 - Fuso do nível Y com respectiva fixação e manípulo..... | 41 |
| Figura 4.13 – Cantoneira..... | 42 |
| Figura 4.14 – Régua gravada na cantoneira..... | 43 |
| Figura 4.15 - Engrenagem horizontal..... | 44 |
| Figura 4.16 – Unidade de contacto..... | 46 |
| Figura 4.17 – vistas com cortes da região superior do sistema de suporte | 47 |
| Figura 4.18 – Sistema de posicionamento e região inferior do sistema de suporte..... | 50 |
| Figura 4.19 – Imagem real do instrumento | 50 |
| Figura 4.20 – O instrumento..... | 50 |
| Figura 5.1 - Plano XOZ (a) e YOZ (b) da estrutura de calibração..... | 53 |
| Figura 5.2 - Gráfico da média e dispersão do erro da medição da coordenada X (plano YOZ) | 62 |
| Figura 5.3 - Gráfico da média e dispersão do erro da medição da coordenada Y (plano XOZ) | 63 |
| Figura 5.4 Gráfico da média e distribuição do erro da medição da coordenada Z (plano XOZ + plano YOZ)..... | 63 |

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 - Propriedades dos materiais em estudo para a estrutura da unidade de contacto [56, 57, 61] | 46 |
| Tabela 5.1 – Listagem das coordenadas seleccionadas para os pontos de referência | 52 |
| Tabela 5.2 – Correções para os valores dos pontos de referência..... | 54 |
| Tabela 5.3 – Correções associadas aos valores medidos e esperados..... | 61 |

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Ao longo da gravidez, o corpo da mulher passa por uma série de alterações biomecânicas, bioquímicas e emocionais [1], para criar as condições necessárias ao desenvolvimento e nascimento de uma nova vida, desde a ovulação até ao parto [2].

Essas alterações são a fonte de uma diminuição da qualidade de vida da mãe com o desenvolvimento de lombalgias e dores na região pélvica [3, 4]. Apesar de esta condição ser inerente à maternidade, muitas vezes prolonga-se para o período pós-parto podendo tornar-se numa condição clínica patológica crónica [1]. Assim sendo, a gravidez pode ser um factor crítico para o desenvolvimento de problemas de costas crónicos debilitantes e condicionadores das actividades diárias da vida das mães.

Em muitos casos, as alterações, quer anatómicas, quer associadas à cinética e cinemática da estrutura músculo-esquelética, são consequência de modificações da posição e da morfologia das estruturas anatómicas, particularmente as alterações relacionadas com a expansão uterina e com o parto [3-5]. Nestas condições, essas estruturas anatómicas estão sujeitas a forças em novas direcções relativamente à sua posição natural e tentam adaptar-se dentro da sua plasticidade [5-7]. No entanto, muitas vezes esta adaptação não é eficaz, levando à sobrecarga e desenvolvimento de uma condição patológica que, por sua vez, pode originar a condição crónica referida anteriormente [1]. Considera-se então que a gestão destas alterações e sobrecargas, através da terapia física e manual (terapia conservativa) possa ser uma estratégia sólida para diminuir a incidência e a gravidade de estados clínicos patológicos durante a gravidez e o período pós-parto [1, 8, 9]. A definição desta estratégia exige a compreensão da evolução da anatomia materna ao longo da gravidez e um estudo da sua reacção às técnicas de terapia manual [1, 3].

O aumento de peso, resultante do desenvolvimento do feto na região abdominal e da acumulação de tecido adiposo [2, 3], origina um aumento das cargas exercidas sobre a coluna vertebral e a cintura pélvica materna, tal como a alteração do centro de gravidade (centro de massa). Estas mudanças, por sua vez, forçam a alteração das posições dessas estruturas anatómicas [1, 6]. É então essencial estudar o comportamento e posicionamento da coluna vertebral ao longo da gravidez na posição de pé [1, 3, 10]. As técnicas imagiológicas mais utilizadas na análise destas estruturas são a radiografia, a tomografia computadorizada e a ressonância magnética [11, 12]. No entanto, as mulheres grávidas constituem um grupo populacional com características particulares. A sua exposição à radiação, particularmente para questões de investigação, é contra recomendada,

pois o feto é muito sensível à radiação devido à sua elevada taxa de crescimento e desenvolvimento tecidual [11].

O cenário descrito no parágrafo anterior impõe a utilização uma ferramenta baseada num método não invasivo para determinar o posicionamento e forma da coluna vertebral. Apesar de já haver alguns métodos em desenvolvimento, são dispendiosos, pouco portáteis e dependentes do ambiente envolvente. Consequentemente, a imposição definida anteriormente implica a concepção um instrumento que faça as medições antropométricas necessárias, respeitando as condições particulares do grupo populacional alvo (não invasivo).

Numa fase posterior, pelo facto de ser um método não invasivo, a sua utilização poder-se-á revelar interessante a outros grupos populacionais.

1.2 Objectivos

O objectivo desta tese de mestrado é conceber um instrumento que permita determinar a posição tridimensional das apófises espinhosas das 25 vértebras, palpáveis a partir da superfície da pele. Há 4 objectivos resultantes deste primeiro:

- a) Definição das características do instrumento, das condicionantes que tem de respeitar e de um desenho/conceito orientador.
- b) Definição dos mecanismos a utilizar e desenvolvimento do seu desenho.
- c) Construção e aperfeiçoamento do instrumento
- d) Validação do instrumento e análise da sua capacidade de medição.

1.3 Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 é feita a introdução à dissertação com a apresentação da motivação inerente a esta, dos seus objectivos e da sua estrutura.

No capítulo 2 é feita uma breve exposição sobre as alterações fisiológicas que influenciam directamente o equilíbrio biomecânico do corpo da mulher ao longo do período de gestação. Considerando as estruturas anatómicas associadas à medição efectuada pelo instrumento, também são apresentadas as características funcionais e anatómicas da coluna vertebral relevantes para a concepção do instrumento. É ainda definida a janela de oportunidade resultante da exposição anterior.

No capítulo 3 é abordado o conceito de instrumento de medição. São apresentadas algumas das técnicas actualmente existentes, como fonte de ideias para o desenvolvimento do projecto de concepção do novo instrumento. Por fim, é apresentada a teoria de projecto mecânico – base para o desenvolvimento do novo instrumento exposto no capítulo seguinte.

No capítulo 4, são desenvolvidos todos os conceitos e respectivos parâmetros técnicos de todos os mecanismos e componentes associados ao instrumento, segundo a teoria de projecto de concepção e a teoria de sistemas. Também é apresentado o modelo físico do instrumento – o protótipo – para avaliação da concepção desenvolvida através do processo de validação exposto no capítulo seguinte.

No Capítulo 5 é apresentado o processo de validação. Este inclui a concepção e construção da estrutura de calibração, o procedimento de medição e ainda os resultados obtidos.

No capítulo 6 é discutido o desempenho do instrumento e são apresentadas propostas para o seu desenvolvimento posterior.

Por fim no Capítulo 7 é apresentada a conclusão da dissertação com a sua análise global.

2. Exposição Teórica

2.1 Alterações da mulher durante a gestação

O nascimento de novos seres humanos exige um conjunto específico de condições que o corpo da progenitora (mãe) tem de assegurar [2]. Os processos de formação, desenvolvimento e nascimento ocorrem num período temporal denominado por período gestacional, gestação ou gravidez. Mais concretamente, este período é limitado pela fecundação e pelo parto. A fecundação é definida como a fusão entre as células sexuais masculina (espermatozóide) e feminina (óvulo) e consequente formação do ovo. O parto é definido como a expulsão do feto do interior do útero materno [13].

No entanto, ainda antes do início da gestação, há um aumento da produção hormonal. Entretanto, o corpo feminino aguarda por um sinal (fecundação) para iniciar todo o processo de gestação, no qual o útero materno prepara-se para receber a implantação do ovo e a formação da placenta. Esta última garante o fornecimento de nutrientes, oxigénio e ainda a recolha de todas as substâncias tóxicas resultantes dos processos metabólicos do novo elemento (bebé) [14].

Durante a gestação, o corpo feminino é alvo de constantes transformações e adaptações a nível fisiológico (hormonal e bioquímico) e mecânico (anatômico). Este processo inicia-se com o aumento de produção das hormonas sexuais que desencadeia um conjunto de alterações fisiológicas. Há um aumento no volume de plasma, originando um aumento do volume de sangue e, consequentemente, um aumento do fluxo cardíaco. Adicionalmente, há um aumento do ritmo (batimento) cardíaco. Estes dois factores provocam um efeito cumulativo de aumento do débito cardíaco. A nível respiratório, o volume residual de ar nos pulmões diminui e aumenta a fluxo de ar por minuto. Estas alterações procuram garantir a manutenção das trocas entre mãe e feto na estrutura placentário-uterina à medida que o feto se vai desenvolvendo e o útero vai-se expandindo [2] [14-16].

A expansão do útero e a ocupação do espaço pertencente à cavidade abdominal, para além da ocupação prévia da cavidade pélvica, induzem a compressão das estruturas viscerais, a ascensão da própria cavidade torácica em cerca de 40 mm e o alargamento do seu diâmetro [5, 15, 16]. Há um aumento da produção de relaxina, que aumenta a flexibilidade das estruturas anatómicas, especialmente as musculares e as de estabilização articular (ligamentos) [2, 5, 16]. O aumento da amplitude de movimento articular possibilita um conjunto de alterações anatómicas a nível ósseo. Estas alterações também influenciam as estruturas que se inserem nos ossos (músculos), modificando a sua eficiência (capacidade de exercer um momento de força nos segmentos (ossos) da articulação), grau e frequência de solicitação [2, 5, 16].

O desenvolvimento do feto, das estruturas anatómicas maternas e da retenção de líquidos em torno da gestação (líquido amniótico e aumento do volume sanguíneo) origina um aumento de peso na porção mais anterior do tronco (região ventral) [2, 3, 6, 16, 17]. Este, em conjunto com o aumento de pressão interna e a mobilidade articular exagerada, altera o sistema biomecânico do corpo materno e o seu centro de massa, deslocando-o anteriormente [2, 6, 16, 17]. No entanto, Foti et al [18] fez uma análise do ciclo de marcha de mulheres no período gestacional comparativamente com mulheres que não se encontravam nesse período. Deste estudo, não identificou diferenças significativas entre o ciclo de marcha das duas populações, concluindo que o corpo materno adaptava-se de forma a compensar o aumento de peso corporal à medida que o feto se desenvolvia [18]. Mais uma vez, está presente o conceito de que o corpo materno tem de se adaptar continuamente. Tendo em conta que a transferência das cargas sofridas pelo tronco são transmitidas para base do esqueleto humano pela coluna e através da pelve, literatura variada sugere a existência de alterações da morfologia do conjunto de curvaturas da coluna vertebral e da disposição da pelve. Estas mudanças são facilitadas pela elasticidade articular e pigmentar adicional oferecida pela hormona relaxina nas articulações intervertebrais, sacro-ilíacas e sínfise púbica. Algumas das adaptações sugeridas são o acentuar das curvaturas da coluna (hiperlordose e hipercifose), rotação anterior da pelve, afastamento entre os ossos coxais [2, 5, 6, 10, 14, 16, 18, 19].

Algumas das adaptações do corpo da mulher associadas à gestação, não têm um consenso na comunidade científica, como a formação da hiperlordose lombar [18]. No entanto, Withcome et al [6] afirma que existe um dimorfismo sexual e que a coluna lombar da mulher tem uma predisposição, comparativamente com a do homem, para alongar a coluna lombar provocando uma hiperlordose, de forma a reequilibrar o centro de massa do seu corpo sobre os membros inferiores [6], teoria que alguma literatura anterior já considerava como aceite [2, 6, 16, 17]. A própria anatomia da pelve também tem um dimorfismo sexual, já descrito na literatura anatómica [2, 6, 16, 20].

A coluna vertebral comporta-se como um conjunto tridimensional acoplado e dinâmico. Logo, uma alteração numa das suas secções influenciará as outras regiões, através de uma mudança na intensidade ou na direcção de forças (de tensão ou de compressão) exercidas pela região alterada sobre as outras. [21-23] Na mulher grávida, para além destas possíveis alterações biomecânicas, assume-se que também pode haver uma constante pressão interna exercida pelo útero em toda a cavidade abdominal, afectando também a coluna vertebral [2, 6, 14-16].

Por outro lado, a estrutura miológica também tem um papel importante no jogo de estabilização cinética [2, 6, 7, 14, 16, 24]. Um exemplo é o grupo dos músculos abdominais: apesar destes se estenderem com a expansão uterina, como esta é suficientemente lenta para haver um

acompanhamento de crescimento muscular, não há perda na capacidade de tensão muscular. No entanto, há uma alteração na direcção sobre a qual é exercida a acção muscular diminuindo a sua eficiência funcional [3, 14, 16]. Outros músculos que também se adaptam para garantir o suporte do corpo são os quadrícepedes, aumentando a sua força e dimensão como resposta ao aumento de peso [2].

É exposto largamente na literatura que estas alterações são as principais causas de dor, particularmente dor na base das costas (coluna lombar), dor na região pélvica anterior e posterior e ainda dor abdominal. Vários estudos referem uma incidência de dor de costas durante a gravidez de 50% a 90% [1, 3, 4, 9, 16, 25]. Aquando destes estados, há um aumento de desconforto a diferentes graus, debilitação e perda qualidade de vida durante a gravidez. Estas alterações e a respectiva dor, também podem desencadear um estado patológico ou o agravamento de um estado patológico pré-gestacional, podendo tornar-se num estado agudo ou até crónico [1, 16, 24]. Ostgaard, em alguns estudos sobre a dor de costas, a dor pélvica e a gravidez na Suécia verificou que cerca de 17% das mulheres que sentiram dor de costas durante a gravidez, ainda apresentavam essa sintomatologia seis anos depois do parto, tendo-se tornado num estado crónico [9]. É aceite por vários autores que factores como peso, altura, peso do feto e número de filhos não têm influência na dor de costas. Mas a dor de costas pré-gestação ou dores de costas em gestações prévias já são vistas como factores indiciadores de dor de costas na gestação seguinte [26].

Em diferentes estudos baseados em questionários feitos a grávidas sobre a dor de costas, uma percentagem significativa não relata essa sintomatologia ao seu médico. Quando alertados para esta situação, há muitos casos em que os médicos não providenciam um tratamento adequado, pois este é considerado como um estado clínico normal associado à gravidez, porque no período pós-parto o corpo tende a voltar a assumir a forma que tinha no período pré-gravidez [4, 16, 18]. No entanto, como já foi referido, este estado clínico pode-se agravar ou tornar-se crónico. Para além disso, a dor pode levar a mãe a recorrer a analgésicos que, em doses não controladas, podem ser prejudiciais para o feto [4].

Uma estratégia que surge como uma solução viável é a terapia conservativa, através de terapia manual, correcção postural, fortalecimento muscular pré-gestação e educação. Nesta última, a mãe é informada sobre o seu estado fisiológico e as alterações constantes que vai sofrer. Assim poderá antecipar situações de risco, evitá-las e ainda ter mais serenidade para lidar com momentos complicados associados à gravidez [1, 9, 15, 26].

Apesar da variada experiência associada ao acompanhamento da mulher e do embrião/feto ao longo de toda a gestação, na comunidade científica não existe consenso em algumas questões associadas com as alterações músculo-esqueléticas. Relativamente à adaptação tridimensional das

curvaturas da coluna vertebral e da posição da pelve (cintura pélvica) durante a gestação, em particular, como já foi exposto acima, há convicções (conhecimento empírico, que é essencial), mas não há fundamentação experimental que as corrobore.

As técnicas de terapia conservativa necessitam de um conhecimento sólido sobre as alterações induzidas por este estado fisiológico – gestação – para poderem actuar da forma mais eficaz possível. Torna-se então pertinente o acompanhamento e avaliação destas alterações através de um estudo científico, com a utilização de um instrumento que permita quantificar essas alterações [1, 3, 6, 25].

As estruturas músculo-ligamentares que sofrem mais alterações durante a gravidez encontram-se inseridas na coluna vertebral e/ou na cintura pélvica. Logo, estas duas últimas estruturas ósseas são consideradas as estruturas anatómicas do sistema esquelético que sofrem mais influência das alterações fisiológicas induzidas na mulher pela gestação. Esta influência é recíproca, criando-se um ciclo de alterações no corpo da mulher. Note-se que a cintura pélvica inclui a coluna sacro-coccígea, que pertence à coluna vertebral. Consequentemente, torna-se evidente que é necessário avaliar as alterações que a coluna vertebral sofre durante o período de gestação para se poder compreender, como um todo, as alterações músculo-esqueléticas associadas à gestação.

2.2 A estrutura músculo-esquelética humana

O sistema esquelético do corpo humano é constituído por ossos que asseguram a estrutura do corpo humano, protegem os órgãos vitais e as cavidades do tronco e ainda fornecem apoio para a inserção dos músculos [27-28]. A coluna vertebral é uma estrutura anatómica óssea deste sistema, cumprindo funções de (1) protecção da medula espinhal e respectiva vascularização, (2) sustentação da cabeça, (3) distribuição das cargas dos membros superiores, cabeça e tronco para os membros inferiores e (4) execução dos movimentos de rotação, flexão antero-posterior e flexão lateral do tronco. A coluna vertebral é constituída por 33 a 34 ossos – denominados vértebras – interligados por discos intervertebrais através dos seus corpos. Para além do corpo, as vértebras também apresentam um conjunto de estruturas posteriores (arco vertebral) – apófises, lâminas e pedículos – que asseguram a estabilização da posição entre as vértebras, fornecem sustentação à inserção de ligamentos e de músculos, para estabilização das articulações e execução de movimento, respectivamente. Protegida entre o arco vertebral e o corpo encontra-se a medula espinhal, da qual se ramificam todos os nervos do sistema nervoso periférico. A nível morfológico, a coluna apresenta um conjunto de quatro curvaturas (denominadas de colunas), resultantes das suas funções específicas. Começando pela extremidade mais cranial (superior), a coluna vertebral descreve uma curvatura convexa relativamente à região anterior – coluna cervical – composta por sete vértebras (C1 a C7). De seguida, assume uma curvatura côncava relativamente à região posterior – coluna torácica ou dorsal – ao longo de 12 vértebras (T1 a T12). Depois forma outra curvatura novamente

convexa relativamente à região anterior – coluna lombar – de cinco vértebras (L1 a L5). A extremidade mais caudal (inferior) da coluna vertebral apresenta uma curvatura côncava relativamente à região anterior – coluna sacro-coccígea – formada por dois conjuntos de vértebras soldadas – sacro e cóccix. Estas duas últimas estruturas anatómicas resultam da fusão de 5 vértebras sagradas (S1 a S5) e quatro a cinco vértebras coccígeas, respectivamente [20, 29].

Cada curvatura das diferentes colunas é classificada de cifose se for côncava relativamente à região anterior da coluna ou de lordose se for convexa relativamente à mesma região referida anteriormente. Apesar da coluna vertebral não apresentar anatomicamente uma curvatura significativa no plano antero-posterior, esta última pode-se manifestar na realidade, sendo denominada de escoliose. Consequentemente, a coluna cervical e a coluna lombar apresentam lordoses e a coluna torácica e a coluna sacro-coccígea apresentam cifoses [20]. Quando a coluna vertebral não se encontra na sua posição natural anatómica as curvaturas naturais acentuam-se (hiperlordose e hipercifose) ou atenuam-se (hipolordose e hipocifose).

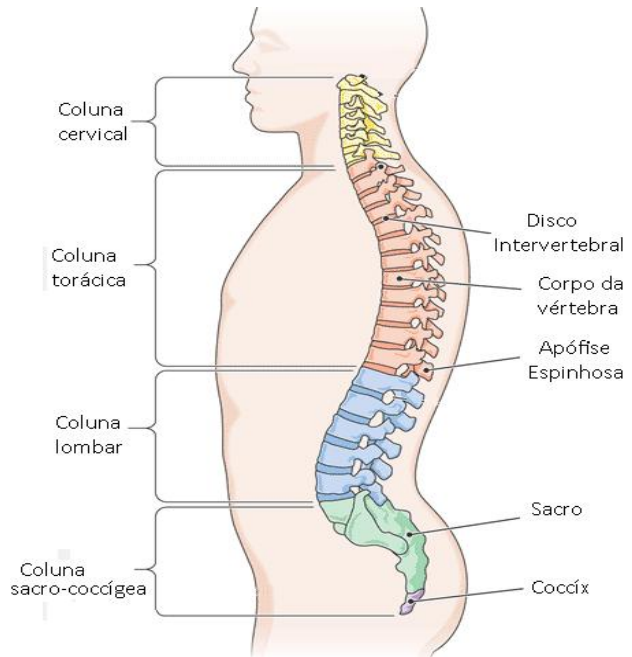


Figura 2.1 – A coluna vertebral [30]

A nível funcional, a coluna cervical sustenta, estabiliza e fornece mobilidade à cabeça. A coluna torácica, em conjunto com o esterno e as costelas, forma a caixa torácica que protege órgãos vitais como o coração, os pulmões e os grandes vasos. A coluna lombar é responsável pela sustentação e passagem de todas as forças transmitidas por todas as estruturas anatómicas superiores a si, através das outras duas colunas superiores e ainda garantir a mobilidade do tronco. A coluna sacro-coccígea transmite as cargas de todas as estruturas anatómicas superiores a si, para os membros inferiores através dos ossos coxais. Ambas as porções cervical e torácica protegem a espinal medula. Já as porções lombar e sacro-coccígea protegem a cauda equina. Todas protegem o início das ramificações da medula espinal [20].

A maioria das vértebras adjacentes articula-se através dos corpos vertebrais e através das apófises articulares. As articulações entre corpos são constituídas por discos intervertebrais e dois ligamentos ao longo de todas as vértebras (um anterior e outro posterior). Os discos intervertebrais são constituídos por um anel fibroso (porção periférica, mais rígida) e um núcleo gelatinoso (porção central, mais mole e hidrófilo). Estes têm um papel importante no amortecimento dos impactos

exercidos sobre a coluna, sendo que a sua dimensão é variável e dependente das cargas exercidas por esses impactos. As lâminas e as apófises transversas e espinhosas de vértebras adjacentes estão interligadas por ligamentos intervertebrais [20].

Apesar das diferentes posições e morfologias de cada um dos conjuntos de vértebras referidos, todas as vértebras apresentam apófises espinhosas, transversas e articulares. Também apresentam pedículos e lâminas. A apófise espinhosa de cada vértebra encontra-se na região mais dorsal (posterior) de toda a vértebra, projectando-se quase todas para a superfície dorsal do tronco e pescoço, tendo apenas o tecido adiposo e a derme a separá-las do meio exterior [20].

A interligação e passagem das cargas do tronco para os membros inferiores são feitas através da cintura pélvica, outra estrutura anatómica óssea do sistema músculo-esquelético. Esta é constituída pelo sacro, cóccix e por dois ossos coxais paralelos. O sacro e o cóccix, já referidos anteriormente, estão interligados pela articulação sacro-coccígea. Os ossos coxais encontram-se divididos em três partes: ílion (mais superior), púbis (mais anterior) e ísquion (mais posterior). Articulam-se com o sacro através da articulação sacro-ilíaca, e entre si através da sínfise púbica, formando todos, em conjunto com os ligamentos que unem este quatro ossos, a pelve ou bacia [20].

2.3 Definição de uma necessidade

A necessidade de avaliar a coluna vertebral, por parte da medicina, levou à construção de vários instrumentos e ao desenvolvimento de diferentes técnicas, na tentativa de quantificar estas variações. Antes de se considerar o instrumento em si, é necessário definir a necessidade que este terá de satisfazer. O instrumento terá de medir as diferentes curvaturas da coluna vertebral em mulheres grávidas. O grupo populacional a quem se pretende aplicar o instrumento – a mãe e particularmente o novo ser – tem características muito específicas, pois é mais sensível que o ser humano no seu estado fisiológico normal. Associado à elevada sensibilidade e fragilidade do novo ser, o facto de o instrumento ser aplicado na coluna vertebral da mulher aumenta o possível efeito nocivo que as técnicas utilizadas pelo instrumento possam ter no novo ser. Isto porque o útero, onde se desenvolve o novo ser, encontra-se muito próximo da coluna vertebral, particularmente na coluna torácica e lombar. É imperativo garantir a inocuidade das técnicas e princípios físicos utilizados, através de evidências clínicas e científicas. Estas considerações bioéticas e de segurança têm de estar sempre presentes e têm uma relevância adicional, pois o instrumento tem uma utilização puramente científica e preventiva [31].

Estudos relativamente às adaptações fisiológicas e alterações patológicas das curvaturas da coluna vertebral, especialmente escoliose (tipicamente avaliada com radiografias frontais) demonstram que uma análise bidimensional não expressa correctamente a forma da coluna

vertebral. Assim sendo, é importante que a quantificação da curvatura da coluna vertebral seja espacial (tridimensional), pois a sua morfologia assume uma forma tridimensional [32, 33].

Outra questão pertinente é o facto da mulher grávida ter de estar na posição erecta. Esta posição é importante para a compreensão do equilíbrio do sistema biomecânico (de estruturas anatómicas e de forças (tensão e compressão)) que se pretende estudar, porque a força de gravidade é fulcral na definição das propriedades mecânicas das diferentes estruturas anatómicas que constituem esse sistema. A força de gravidade também exerce uma influência muito significativa sobre a morfologia posicional variável da curvatura tridimensional da coluna vertebral, ou seja, a curvatura postural da coluna vertebral da mulher grávida. Na posição supinada, a força de gravidade é exercida numa direcção normal à força de gravidade que é exercida aquando da posição erecta. Para além disso, na posição supinada o tronco está totalmente apoiado havendo uma força de reacção, proveniente da superfície de apoio, que se contrapõem à força de gravidade anulando esta última. Logo, na posição supinada, a curvatura postural da coluna vertebral é alterada, afastando-se do enquadramento que se pretende avaliar [34]. Assim sendo, o instrumento terá de ter uma estrutura de posicionamento adequada à mulher grávida, na qual esta se posicionará. No entanto, a posição erecta não é uma posição estática, no sentido em que o sistema de equilíbrio biomecânico do corpo humano origina um ligeiro balanço do tronco e da cintura pélvica [35]. O instrumento terá de ter em conta este aspecto, importante numa medição estática. A melhor forma de contrariar este efeito seria obter todos os pontos num curto intervalo de tempo, que se pudesse considerar virtualmente momentâneo.

Por fim, o instrumento deverá tender para a configuração que seja o mais simples possível a nível técnico e de utilização, para que o profissional de saúde que interage com o grupo populacional em estudo possa considerá-lo uma ferramenta útil e viável numa dimensão clínica.

A análise inicial desenvolvida nos parágrafos anteriores demonstra que o instrumento tem: (1) de executar uma aquisição tridimensional dos dados da coluna vertebral da mulher grávida; (2) ser o menos exigente possível a nível técnico e, simultaneamente ter uma aplicação simplificada; (3) respeitar as condicionantes bioéticas e de segurança da mulher grávida e do novo ser; (4) ser capaz de se adaptar à diversidade antropométrica do grupo populacional em estudo; (5) ser aplicado à mulher grávida na posição erecta; (6) considerar o efeito do balanço inerente à posição erecta da mulher grávida.

3. INSTRUMENTOS

3.1 Definição de instrumento

A avaliação de um parâmetro genérico em qualquer campo das ciências é utilizada para compreender algo que se pretenda conhecer. Mais concretamente, a avaliação consiste na comparação entre os parâmetros de um elemento a ser avaliado e os parâmetros de um elemento de referência. Essa comparação tem de ser executada através da qualificação (quantitativa ou qualitativa) dos parâmetros de cada um dos elementos referidos anteriormente. A qualificação dos parâmetros do elemento de referência é pré-definida, sendo-lhes atribuídos um valor específico, de acordo com convenções acordadas na comunidade científica. Na área da Ciência Física e da Ciência de Engenharia, é atribuído um valor físico (unidade de medição) aos parâmetros do elemento de referência mensuráveis (grandeza física) de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI) acordado pela Conferência Geral de Pesos e Medidas. A qualificação dos parâmetros do elemento a ser avaliado é executada através da medição de valores com grandeza física (e respectiva unidade de medição) igual à dos parâmetros do elemento de referência. Por sua vez, a medição dos parâmetros do elemento a avaliar é executada por um instrumento de medição – dispositivo, utensílio, aparelho – ao qual está associada uma grandeza física e respectivo padrão, segundo a unidade de medição correspondente. Ao parâmetro medido denomina-se por *mesuranda*. [36]

Associado à *mesuranda* medida há sempre uma incerteza. Esta é caracterizada por um intervalo de valores (dispersão) no qual a *mesuranda* se encontra, não sendo possível definir totalmente a sua posição dentro desse intervalo. Logo, em ciência a incerteza é uma característica da medição inerente a esta que tem de ser definida. São utilizados três conceitos fundamentais na definição da incerteza. [37-39]. Estes são:

- 1) **Exactidão** – Parâmetro que compara um valor medido com um valor pré-definido (“real”).
- 2) **Fidelidade** – Parâmetro que, num conjunto de medições, compara-as com o valor mais provável associado a essa medição. Está associado à dispersão desse conjunto de medições.
- 3) **Repetibilidade** – Parâmetro associado à dispersão existente entre duas medições consecutivas sobre condições semelhantes.

Ao caracterizar-se a incerteza de uma medição obtém-se um método de avaliação da qualidade da medição e, conseqüentemente do desempenho do instrumento, dispositivo ou aparelho de medição [37-39].

3.2 Técnicas de medição típicas em ambiente clínico

A Medicina utiliza instrumentos para avaliar anatomicamente a coluna vertebral a nível funcional e morfológico, tal como as suas variações fisiológicas e patológicas. Existem dois tipos de abordagens relativamente ao objectivo de medição na coluna vertebral: pode ser (1) funcional, avaliando a amplitude máxima dos movimentos executados pela coluna vertebral, sendo medido de forma contínua ou apenas nas posições de amplitude máxima e amplitude nula, ou (2) morfológica (anatômico) avaliando a posição geométrica relativa ou absoluta de estruturas anatómicas, geralmente as vértebras. Para uma quantificação das curvaturas da coluna vertebral, a abordagem morfológica é mais recomendada. Além disso, há um conjunto de restrições relativamente à mulher grávida, especialmente a partir de certo estágio da gravidez, que desaconselha a execução dos movimentos que são necessários à realização da avaliação funcional, por o novo ser se encontrar na região abdominal materna.

Actualmente existem um conjunto de técnicas e instrumentos com validade clínica, que executam exames auxiliares de diagnóstico, a partir dos quais é possível adquirir imagens do interior do corpo humano e, conseqüentemente, os dados pretendidos – posição tridimensional das estruturas anatómicas que compõem a coluna vertebral.

A técnica mais comum é a radiografia, a qual permite a aquisição bidimensional da estrutura óssea do paciente, quer seja na posição erecta, quer seja noutras posições. Esta baseia-se na projecção de radiação ionizante sobre o paciente e na respectiva absorção (num alvo) do espectro de dispersão dessa radiação, provocado pelas estruturas ósseas do paciente. Diferentes algoritmos têm sido explorados para a obtenção de um registo tridimensional através da associação entre duas radiografias obtidas consecutivamente e de ângulos distintos e bem definidos. A tomografia computadorizada utiliza o mesmo tipo de radiação que a radiografia, mas a reconstrução da imagem é obtida computacionalmente por interpolação tridimensional dos dados obtidos. No entanto, este exame é feito com o paciente na posição supinada. A ressonância magnética é outro método de análise da anatomia interna humana, a qual é tipicamente aplicada a pacientes também na posição supinada, mas fundamentada num princípio físico diferente da radiografia e da tomografia computadorizada: baseia-se na medição dos campos magnéticos gerados pelos núcleos dos átomos do corpo humano, enquanto estes retornam à sua posição estabilizada após serem estimulados com uma sequência/envelope bem definido de ondas de radiofrequência. A ultrassonografia também permite a visualização de estruturas anatómicas internas através da emissão de ondas acústicas e registo do tempo de voo destas desde a sua emissão até à sua detecção. Nesta técnica, a localização tridimensional das estruturas anatómicas é tecnicamente exigente, pois depende da posição da

sonda que é variável (tipicamente controlada manualmente) e também da imagem que é adquirida bidimensionalmente [40].

Comparativamente com outros estados clínicos/fisiológicos, as mulheres grávidas apresentam limitações relativamente aos métodos auxiliares de diagnóstico/avaliação que podem ser utilizados. Por um lado não é recomendável – particularmente para investigação clínica e científica – a aplicação de radiação ionizante em grávidas (Radiografia e Tomografia Computorizada), devido à elevada radio-sensibilidade do novo ser. Inclusivamente, foi relatado em estudos científicos que a incidência de cancro (da mama por exemplo) aumenta significativamente em pessoas que tenham sido expostas a radiação ionizante de radiografias enquanto fetos [41]. Outros métodos, como a ressonância magnética, permite uma reconstrução tridimensional da coluna na posição supinada. No entanto, como já foi referido anteriormente, é imperativo que a aquisição dos dados seja feita com a mulher grávida na posição erecta. Note-se que também existem modelos de equipamentos de Ressonância Magnética para a posição erecta, mas estes são muito menos comuns e, consequentemente, muito mais difíceis de se ter acesso. Para além disso, há ainda a questão de não se conhecer os efeitos da radiação electromagnética da ressonância magnética a longo prazo nos fetos [22]. É então importante recorrer a outros métodos não invasivos, ou seja, que não usem radiação nociva ou potencialmente perigosa, sendo por isso inócuos e seguros.

3.3 Técnicas alternativas: não invasivas

Na procura de alternativas para aquisição de dados relativos à coluna vertebral e respectiva avaliação, vários instrumentos e técnicas foram desenvolvidos e/ou estão em desenvolvimento. Estes procuram ser mais seguros e mais flexíveis comparativamente com os métodos auxiliares diagnóstico mais usuais, especialmente para as populações mais susceptíveis aos efeitos secundários destes últimos. De uma forma genérica, procura-se desenvolver uma abordagem – relativamente diferente das técnicas comuns – na qual a avaliação da coluna vertebral é feita indirectamente a partir das estruturas anatómicas periféricas das vértebras que naturalmente ascendem sob a pele, ao invés de se focarem no corpo (centro) das vértebras directamente como estruturas únicas. Essas estruturas periféricas das vértebras referidas anteriormente são denominadas de apófises das vértebras que podem ser palpadas, particularmente as apófises espinhosas.

3.3.1 Instrumentos médicos não invasivos

A partir da década de 60 do século XX foram desenvolvidos muitos instrumentos, simples e tipicamente mecânicos, inspirados em configurações de instrumentos desenvolvidos no final do século XIX e início do século XX, antes do advento da radiografia. Estes podem ser separados em:

a) Dispositivos que determinam a forma da curvatura bidimensional da superfície do tronco ao longo das apófises espinhosas da coluna vertebral no plano lateral, de forma a determinar o ângulo formado pelas curvaturas anatómicas lordose e cifose. As configurações existentes são pantógrafos, réguas flexíveis, goniómetros, cifómetros, lordocifómetros e arcómetros [42].

b) Dispositivos que medem o ângulo de rotação do tronco quando o paciente executa uma flexão anterior do tronco (teste de Adams), associado à escoliose. As configurações existentes são, escoliómetros, e outros instrumentos puramente mecânicos executando medições de amplitudes angulares ou de variações de amplitudes angulares. Nestes casos é feita uma análise funcional, a qual não é a mais interessante para a avaliação pretendida como foi referido anteriormente [42].

Para além dos instrumentos referidos anteriormente, também se desenvolveram electrogoniómetros, acelerómetros, potenciómetros e até uma conjugação destas diferentes técnicas, centrados nos princípios físicos de electromagnetismo e de resistência eléctrica. Estes instrumentos também estão associados à abordagem funcional da coluna vertebral, avaliando o grau de amplitude dos movimentos da coluna vertebral, tipicamente numa escala angular. Tanto os instrumentos de b) como os instrumentos apresentados no parágrafo anterior têm uma abordagem funcional, a qual não é permite executar a avaliação pretendida, tal como já foi referido anteriormente. Os instrumentos de a) permitem uma análise bidimensional, a qual também não permite obter a avaliação pretendida, tal como já foi referido anteriormente. Para além disso, a fiabilidade intra-examinador e inter-examinador em muitos dos instrumentos não é muito elevada [35, 42].

3.3.2 Técnicas de mapeamento

Mais recentemente, seguindo uma abordagem morfológica tridimensional, foram desenvolvidos outros métodos e instrumentos para mapeamento da superfície do corpo humano sem radiação ionizante. Estes baseiam-se em três técnicas distintas de digitalização de superfícies, características áreas da engenharia como a metrologia, a perfilometria e a topografia:

I.) Com contacto com o corpo analisado. A medição é executada determinando a posição tridimensional da extremidade da sonda que contacta a superfície analisada, através de princípios de geometria. Este tipo de instrumentos pertence ao conjunto das máquinas de medição de coordenadas, tipicamente utilizadas em metrologia. A estrutura mecânica típica utilizada para medição de pontos na superfície do corpo humano (pele) é denominada de braço articulado digitalizador. A sua morfologia e mobilidade são inspiradas na anatomia do membro superior do ser humano (biomimétrica). Fixo a uma base, um conjunto de 3 ou mais elementos cilíndricos de dimensões bem definidas, são articulados entre si pelas suas extremidades

(junções), análogo ao mecanismo composto pelos ossos e articulações do membro superior humano, respectivamente. Cada junção tem um sensor angular incorporado, para que se possa definir a posição da extremidade da sonda. O primeiro instrumento com estas características chama-se Metrecom e foi desenvolvida pela FARO® Inc. Medical Technologies [43].

II.) Sem contacto com o corpo e apoiando-se nos princípios e conceitos de óptica que descrevem a interacção entre radiações (ondas) electromagnéticas não ionizantes e a superfície em analisada. Estas técnicas podem ser classificadas de activas ou passivas, consoante interajam ou não com a superfície em análise. Pode-se dividir este grupo em três secções distintas:

II.a) No grupo óptico passivo, os elementos ópticos adquirem informação do objecto sem o estimular nem interagir com ele. Apenas recebem/detectam e registam as ondas electromagnéticas reflectidas pelo objecto (dentro do espectro da luz visível), ou seja, uma imagem da superfície em análise. Esta técnica pertence à fotogrametria, sendo tipicamente apelidada de estereofotogrametria. A reconstrução tridimensional da informação recolhida recorre a ferramentas desenvolvidas pela geometria projectiva, na qual, é possível fazer uma reconstrução tridimensional da superfície em questão a partir da aquisição de duas ou mais imagens bidimensionais de planos diferentes (vistas ou projecções) e do conhecimento da posição relativa entre os elementos ópticos que as adquiriram (triangulação). Assim sendo, uma montagem típica deste tipo de elementos apresenta apenas elementos ópticos passivos como sensores e câmaras fotográficas ou de filmar [42].

II.b) No grupo óptico activo, a radiação de uma fonte luminosa específica é projectada por um ou mais elementos ópticos activos (projector, laser) e a sua interacção com a superfície em estudo é registada por um ou mais elementos ópticos passivos, ou seja, alguns dos elementos ópticos passivos do grupo óptico passivo são substituídos por elementos do grupo óptico activo. Nesta área, diferentes técnicas têm sido desenvolvidas. Agrupando-as segundo os princípios físicos pelas quais se regem, pode-se separar em técnicas reflectométricas e técnicas de projecção de sombra [44].

II.b.i) Nas técnicas reflectométricas encontram-se a triangulação e o tempo de voo. Na primeira, um feixe colimado, proveniente de uma fonte emissora de (tipicamente um laser), é projectado sobre a superfície em análise e a sua reflexão é detectada por um sensor de posição (tipicamente sensor PSD). O sensor determina a distância desde a fonte de emissão até ao ponto no qual a reflexão do feixe emitido foi recolhida e, baseado na lei da reflexão de Física Óptica, determina o ponto de incidência da fonte de emissão sobre a superfície em análise ou determina a alteração na direcção da normal à superfície. Na técnica de tempo de voo, também é projectado um feixe colimado sob a superfície em

análise e um sensor numa posição bem definida e próxima da fonte recolhe o feixe reflectido, sendo registado o tempo desde a emissão pela fonte até à recepção no sensor. Sabendo a velocidade de propagação do feixe no meio de propagação e relacionando-a com o intervalo de tempo entre a emissão e a detecção do sinal, pode-se determinar a distância entre a fonte do sinal e a superfície em análise [45].

II.b.ii) As técnicas de projecção (sombra) podem ser separadas em técnicas de interferometria (interferometria de Moiré (1) e interferometria holográfica (2)) e técnicas de projecção de luz estruturada ((3) projecção de pontos, linhas horizontais ou verticais, grelhas).

A técnica de interferometria de Moiré (1) é caracterizada pela projecção de uma fonte de luz, após atravessar um padrão de interferências, sobre a superfície em análise. Esse padrão é gerado por duas redes (grelhas de Ronchi por exemplo), ligeiramente desfasadas entre si por uma pequena rotação. Com esta montagem cria-se uma imagem – tipicamente denominada por padrão de Moiré – sobre a superfície em análise. Este padrão é formado por franjas alternadamente brancas e pretas. As transições entre franjas são representativas de variações de profundidade da superfície, sendo atribuída a cada uma, um intervalo de valores consoante os parâmetros da montagem. Assim sendo, o interferograma resultante apresenta a superfície com dados tridimensionais (intervalos de dados), análogo às curvas de nível, características dos mapas topográficos, que unem pontos com igual altitude construindo-se um mapa isométrico [46].

A técnica de interferometria holográfica (2) regista num holograma um padrão de interferometria de uma fonte de luz sobre a superfície de projecção em análise. Uma das vertentes possíveis desta técnica é a aquisição de duas imagens da superfície em análise, temporalmente desfasadas, mas projectadas uma sobre a outra. Numa das imagens existe interferência e na outra não, criando um padrão de franjas no holograma que permite recolher dados tridimensionais da superfície em análise [45].

As técnicas de luz estruturada (3) caracterizam-se pela projecção de um padrão bem definido e conhecido (pontos, linhas ou grelhas) sobre a superfície em análise. A alteração da posição esperada para os diferentes elementos do padrão projectado sobre a superfície em análise, é resultado de variações de profundidade que a dita superfície apresenta. A projecção de um ponto ou de uma linha (tipicamente horizontal) exige um sistema mecanizado de deslocação da fonte de projecção, para além, do conhecimento da posição desta última ao longo de todo o processo. Como alternativa às complicações inerentes a um sistema mecânico que corresponda aos requisitos necessários, o padrão projectado

pode ser uma grelha, ou seja, um conjunto de pontos ou linhas (horizontais ou verticais ou ainda ambas) distribuídos bidimensionalmente sobre a superfície de projecção em análise. Esta técnica é denominada de raster-estéreo-fotogrametria [44, 47].

A exposição de todas as técnicas deste grupo está distribuída de acordo com o método de aquisição de dados e os princípios físicos associados a essa capacidade. No entanto, para a reconstrução de uma imagem tridimensional da superfície em análise, é necessário recorrer-se às diferentes ferramentas matemáticas de interpolação tridimensional e de geometria projectiva. Diferentes técnicas de reconstrução podem ser empregues em cada uma das opções acima expostas [44]. Não sendo da maior relevância nesta fase uma análise detalhada das técnicas de reconstrução, é apenas assinalada a importância e a diversidade desta componente na obtenção da imagem final.

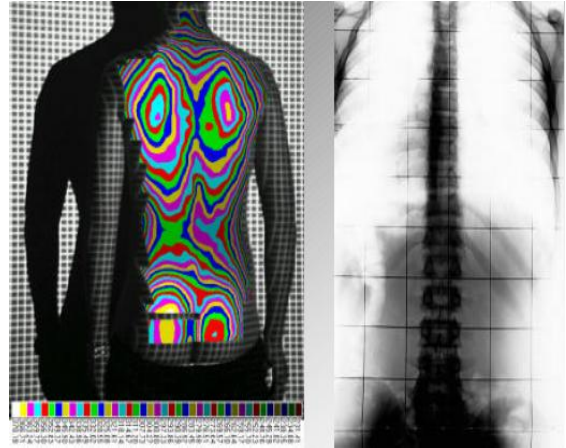


Figura 3.1 – Dados adquiridos por uma técnica de luz estruturada (esquerda) [47]

III.) Sem contacto com o corpo a ser analisado e apoiando-se nos princípios físicos da acústica (ondas sonoras). A técnica utilizada, denominada de “tempo de voo”, é utilizada tipicamente por sonares. Tem um princípio semelhante ao “tempo de voo” em óptica activa. Note-se que as ondas acústicas têm comportamento e características diferentes das ondas electromagnéticas, logo os pormenores técnicos são diferentes da sua homóloga na óptica activa [48].

Tal como nas técnicas ópticas activas, o processamento da informação recolhida exige um esforço significativo para que se consiga uma reconstrução da superfície analisada, representada por uma imagem. Pelas mesmas razões apresentadas anteriormente, não é desenvolvida uma exposição das diferentes técnicas de reconstrução.

As técnicas anteriormente referidas, estão disponíveis actualmente com relativa facilidade e a sua utilização tem sido amplamente explorada. De todas as técnicas e instrumentos não invasivos apresentados, as técnicas de perfilometria da superfície do corpo humano são as que apresentam soluções com capacidade para a aquisição dos dados pretendidos, respeitando as condições impostas. No entanto, estas opções são muito exigentes tecnicamente, quer a nível da aquisição de dados, quer a nível do processamento e reconstrução da imagem. Além disso, alguns dos instrumentos não invasivos acima referidos utilizam radiação electromagnética não ionizante, mas colimada, mais concretamente, os sistemas sem contacto que utilizam lasers como elementos

ópticos activos. O laser não ionizante tem a capacidade de penetração na pele e também aquece o tecido irradiado. O útero, onde se desenvolve o novo ser, encontra-se muito próximo da coluna vertebral, particularmente das colunas torácica e lombar. É reconhecido que o aumento de temperatura corporal da mulher grávida apresenta um risco acrescido ao desenvolvimento saudável do novo ser [15]. Apesar do aquecimento induzido ser local, como seria aplicado numa região muito próxima do útero, não seria seguro pressupor que a utilização de laser na superfície posterior do tronco da mulher grávida não tivesse qualquer efeito sobre o novo ser. Também não seria ético, pois o objectivo da utilização do instrumento é puramente científico ou preventivo [31]. Com este exemplo demonstra-se que, sem a existência das devidas evidências clínicas sobre a segurança associada ao princípio físico aplicado pelo instrumento em questão, não é possível garantir a inocuidade da utilização de radiação não ionizante sobre a pele da região posterior do tronco de mulheres grávidas. Seguindo um raciocínio análogo, para técnicas que utilizem ondas electromagnéticas não ionizantes pela sua componente eléctrica, magnética ou energética, opta-se por não considerar estas opções as mais favoráveis.

Por outro lado, as técnicas baseadas nas ondas acústicas são amplamente utilizadas na mulher grávida em exames ecográficos (ultra-som) [40]. Mas, tal como foi referido anteriormente, a utilização de técnicas apoiadas nesse princípio, aumenta significativamente a complexidade de tratamento dos dados recolhido de forma a obter uma resolução espacial satisfatória. Assim sendo, também não se considera que esta opção seja a mais viável.

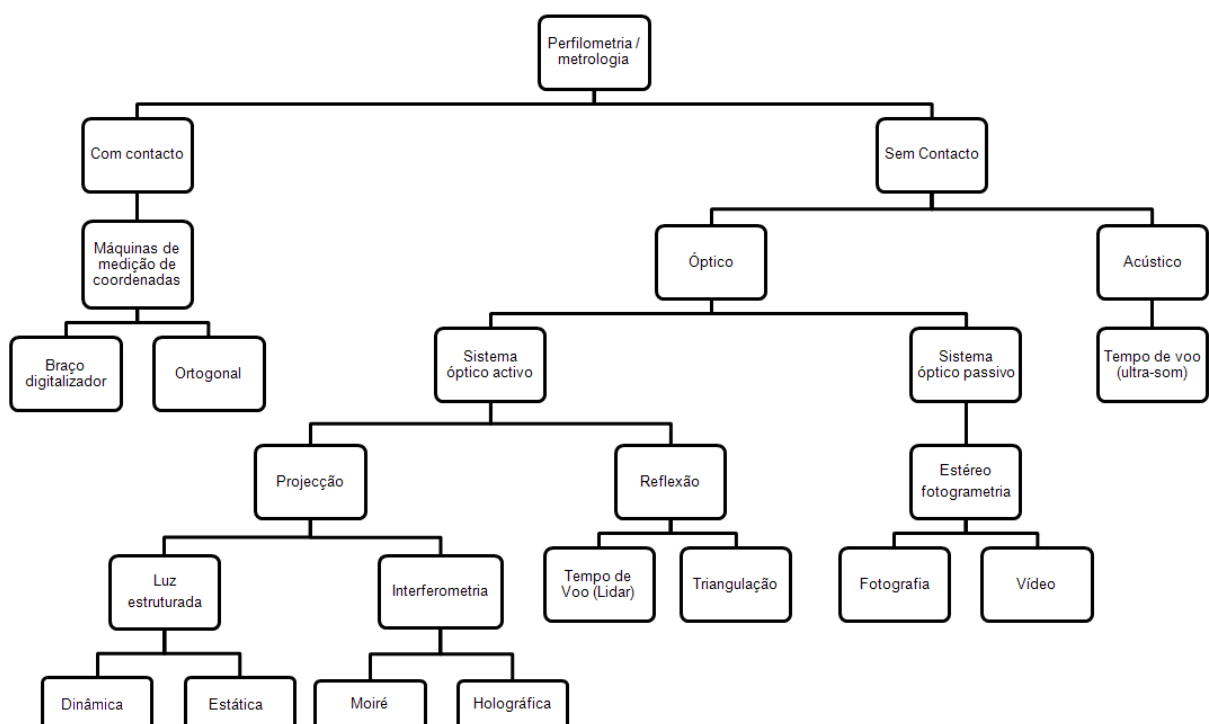


Figura 3.2 – As diferentes técnicas de perfilometria

3.4 Instrumento mecânico

A preocupação com a protecção do grupo populacional em estudo, tal como a necessidade de um instrumento de fácil aplicação e com boa capacidade de aquisição dos dados pretendidos, direcciona a definição das características exigidas para instrumentos que não emitam qualquer radiação prejudicial (independentemente da sua fonte) – efectiva ou potencialmente – tanto para a mãe como para o novo ser. Seguindo este raciocínio, considera-se que possivelmente seja mais adequado um instrumento mecânico, porque (1) não apresenta questões éticas nem de segurança a nível da radiação, (2) tem uma diversidade elevada de mecanismos, elementos, materiais, técnicas e princípios de acção que podem ser aplicados e (3) aumenta as hipóteses do instrumento ter um orçamento menor. Por ser mecânico, o instrumento tem de contactar a mulher grávida. Logo, tem de ser constituído por uma componente caracterizada por contactar a superfície posterior do tronco da mulher grávida (através de uma sonda de contacto) e outra componente que quantifica a posição tridimensional de cada contacto entre a referida superfície e a correspondente sonda. As componentes são interdependentes. Esta concepção mecânica é semelhante a um conjunto de instrumentos, usualmente utilizados em metrologia, denominados de máquinas de medição de coordenadas. Estes já foram apresentados na secção 3.3.2.

Nas técnicas não invasivas sem contacto, todos os dados são obtidos simultaneamente ou num curto intervalo de tempo e a aquisição engloba todos os pontos da superfície em análise um sistema mecânico que contacte a superfície posterior do tronco da mulher grávida implica que a medição seja feita ponto a ponto. Logo, neste sistema torna-se relevante adquirir apenas a posição tridimensional das estruturas anatómicas periféricas das vértebras da coluna vertebral, que sejam tipicamente palpáveis. Tal como foi referido anteriormente, as apófises espinhosas e transversas são estruturas palpáveis das vértebras. Seguindo o conceito utilizado em alguns instrumentos não invasivos anteriormente apresentados, considera-se que é possível medir a curvatura postural tridimensional da coluna vertebral através da determinação da posição tridimensional das apófises espinhosas das vértebras da coluna vertebral. Numa fase posterior, é necessário construir um modelo matemático que determine as posições relativas entre as apófises espinhosas e as respectivas vértebras. Este modelo pode ser desenvolvido utilizando radiografias da curvatura postural de indivíduos saudáveis, que tenham sido prescritas por algum motivo clínico (patológico ou preventivo).

Como já foi referido anteriormente, a posição erecta é caracterizada por um equilíbrio dinâmico, que resulta num balanço natural constante. Logo,



Figura 3.3 – Faro Gage [49]

entre a medição de cada ponto por parte da sonda há a possibilidade da posição do corpo da mulher grávida se alterar e, conseqüentemente, comprometer a qualidade científica dos dados adquiridos. A melhor forma de contrariar este efeito é obter todos os pontos num curto intervalo de tempo, que possa ser considerado virtualmente momentâneo. Ou seja, esse intervalo de tempo tem de ser menor que o tempo que o corpo humano demore a executar uma deslocação do seu tronco (devido ao balanço da posição erecta) equivalente à resolução do instrumento (deslocamento mínimo perceptível pelo instrumento – na ordem de um segundo, ou menor). Num sistema mecânico, esta exigência implicaria uma passagem muito rápida por cada ponto marcado e um registo em tempo real da posição da sonda. Note-se que a sonda tem de ser controlada e deslocada manualmente. Considerando o objectivo do instrumento pretendido, seria exageradamente exigente – técnica e economicamente – a concepção de um mecanismo motorizado suficientemente sensível para garantir a inexistência de qualquer contacto excessivo entre a sonda e a mulher grávida, que a possa ferir (acidentalmente). Logo, a medição pode demorar, numa estimativa optimista, pelo menos alguns segundos.

Existe actualmente um conjunto de instrumentos capazes de adquirir as coordenadas de um ponto muito rapidamente: os braços digitalizadores FARO® Arm e FARO® Gage (FARO® Technologies Inc., Lake Mary, FL, USA). No entanto, estes instrumentos são dispendiosos (entre 8 000 e 10 000 € e entre 20 000 € e 40 000€ respectivamente – valores indicativos) e a aquisição dos pontos necessários demoraria, pelo menos, alguns segundos, visto serem adquiridos um a um. Logo, este instrumento apenas permite uma minimização relativa do efeito de balanço da posição erecta, apesar de exigir um investimento económico avultado.

Seguindo uma perspectiva diferente, pode-se considerar uma opção alternativa: um instrumento que meça todos os pontos em simultâneo, ao invés de um instrumento que meça os pontos um a um. Ou seja, o instrumento tem de ter uma sonda de contacto por cada ponto medido.

Desenvolvendo esta opção alternativa, é necessário que o instrumento tenha um sistema de contacto com elementos paralelos e independentes entre si – unidades de contacto. O número destas unidades tem de ser igual aos pontos que se pretendem medir. Os pontos a medir são agora denominados de pontos de contacto. Estes resultam da intersecção da sonda com o tronco da mulher grávida no ponto correspondente à apófise espinhosa de cada vértebra. Associado às unidades de contactos, é necessário um método que determine a sua posição, mais concretamente, a posição do ponto de contacto. Um sistema de contacto paralelo implica que o instrumento tenha uma estrutura de suporte para essas unidades. Por fim, o instrumento tem de apresentar uma estrutura sobre a qual a mulher grávida se posicione. Seguindo este raciocínio, considera-se a hipótese de se desenvolver um instrumento específico para a aquisição dos dados pretendidos –

segundo o conceito exposto anteriormente – que seja relativamente simples em termos técnicos e de fácil utilização por parte dos profissionais de saúde que interagem com o grupo populacional em estudo.

3.5 Novo instrumento

As diferentes técnicas existentes e expostas anteriormente não se apresentam como soluções óbvias para o instrumento específico. Consequentemente, considera-se a possibilidade de se construir um novo instrumento, com as características definidas anteriormente. As técnicas existentes, apresentadas no início do parágrafo, fornecem algumas referências relevantes para a criação do novo instrumento. Este tem de ser capaz de adquirir a forma das curvas e desvios laterais das vértebras da coluna vertebral de mulheres grávidas na posição erecta. Também é importante que este seja relativamente económico e simples de utilizar. As referências obtidas a partir das diferentes técnicas existentes são: (a) as técnicas de perfilometria que não usam radiação; (b) a apófise espinhosa da maioria das vértebras da coluna vertebral ascende à superfície sob a pele, permitindo a marcação da sua posição; (c) muitas configurações apresentadas na literatura científica relativamente a instrumentos não invasivos utilizam as apófises das vértebras, especialmente as apófises espinhosas, como referência da posição da respectiva vértebra; (d) na literatura referida no ponto anterior, são definidos diferentes conjuntos de vértebras, que podem ir desde a primeira vértebra sagrada até à primeira vértebra cervical (S1-C1) [19, 50, 51].

A partir destas referências pode-se esboçar a ideia inicial relativamente ao novo instrumento. A medição das curvaturas da coluna vertebral na posição erecta far-se-á a partir da determinação da posição espacial das vértebras que a constituem. A posição espacial de cada vértebra será determinada a partir da medição da posição tridimensional da respectiva apófise espinhosa, que por sua vez será marcada sobre a pele na superfície posterior do tronco (costas) da mulher grávida. O objectivo do instrumento será medir a posição tridimensional dos pontos marcados, respeitando as questões bioéticas associadas ao grupo populacional em estudo e sendo adaptável à diversidade antropométrica desse mesmo grupo populacional. Mais concretamente, o instrumento fará a medição com o paciente na posição erecta e terá de ser capaz de medir os pontos marcados independentemente da posição destes últimos. O número de pontos marcados é determinado pelo número de apófises espinhosas que podem ser identificadas por palpação por um profissional especializado (tipicamente um fisioterapeuta), ou seja, desde a primeira vértebra sagrada (S1) até à primeira vértebra cervical (C1), incluindo todas as vértebras lombares, torácicas e cervicais, perfazendo 25 pontos.

3.6 Princípios de concepção e de design

A construção de um novo dispositivo, ou a redefinição de um já existente, implica o desenvolvimento do respectivo “design”, através de um projecto de concepção. Este último inclui não só as características que definem o instrumento em si como, por exemplo, a forma, as funções, os materiais, as propriedades físicas, mas também os conhecimentos e as actividades utilizados durante desenvolvimento do instrumento como a invenção e criação, o cálculo, a optimização e a avaliação. O projecto de concepção de um dispositivo desenvolve-se através de um processo, denominado genericamente de processo de um produto.

Ullman sintetiza-o [37], de uma forma genérica, num conjunto de procedimentos: (1) reconhecimento da existência de uma necessidade (2) definição do problema e das especificações (3) desenvolvimento de soluções (conceitos) (4) análise e optimização dos conceitos propostos (5) desenvolvimento e optimização detalhados do produto (6) avaliação do produto desenvolvido.

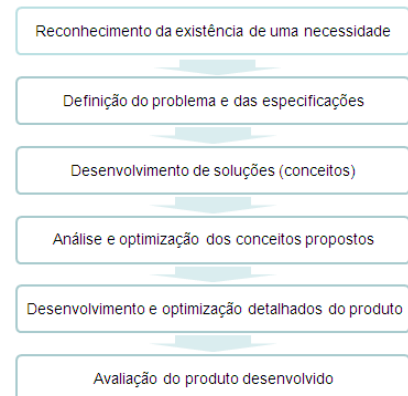


Figura 3.4 – Etapas do projecto de concepção [37]

A motivação para a construção de um novo produto surge tipicamente de forma espontânea, resultante (da descoberta) da incapacidade de resolver um problema. É o procedimento inicial (procedimento 1), pois antecede o desenvolvimento metódico de qualquer aspecto associado a esse problema. Antes de se pensar em possíveis soluções, é necessário determinar os diferentes aspectos do problema o mais detalhadamente e rigorosamente possível (procedimento 2). É essencial procurar que tudo o que seja desenvolvido ao longo do processo de concepção, não se desvie do problema gerador da necessidade do produto, pois caso contrário o produto terá uma probabilidade muito maior de ser desadequado relativamente às funcionalidades e características que se procuram. Neste procedimento são definidos os destinatários do produto, as exigências e os requisitos técnicos e funcionais e ainda as características preferenciais.

Após compreender-se o que se pretende com o novo produto, é necessário desenvolver diferentes soluções, gerando ideias com algum grau de abstracção (esboços ou expressões) e sem preocupação com parâmetros técnicos detalhados (procedimento 3). Estas soluções são definidas como conceitos. Nesta fase é importante não haver contenção nem preocupação com a exequibilidades dos conceitos, caso contrário, torna-se bastante difícil gerar um conceito distinto dos existentes nos diferentes produtos disponíveis no mercado. Tendo um conjunto de conceitos, é necessário compará-los entre si e com as especificações do problema, definidas anteriormente. É então feita uma selecção dos conceitos possivelmente capazes de satisfazer as especificações e são analisados os outros para possíveis alterações de forma a serem incluídos no primeiro grupo

(procedimento 4). Os conceitos deste grupo são comparados entre si e são avaliados os pontos fortes e pontos fracos mais relevantes. Como resultado, deve surgir um conceito que será desenvolvido posteriormente. Quando não há um conceito suficientemente satisfatório, reinicia-se este procedimento, podendo aglutinar-se sugestões de conceitos diferentes ou procurar-se alternativas totalmente distintas. Tendo a ideia do produto (conceito) delineada, é iniciado o processo de definição dos parâmetros, cálculos e outras opções das soluções técnicas associadas ao conceito seleccionado (procedimento 5). São estudadas as diferentes opções e definidos critérios de selecção não esquecendo todas as especificações, requisitos e exigências expostos no procedimento 2. Entre outros aspectos, estão incluídos a selecção de materiais, as definições geométricas (forma, características da superfície) e processos de fabrico. Tal como no procedimento anterior, é feita uma avaliação para selecção das opções disponíveis. Neste caso, a avaliação é feita por testes a modelos. Estes modelos podem ser físicos, analíticos (modelo matemático, paramétrico ou de simulação) ou gráficos (esboços, desenhos), devendo ser utilizados os mais adequados a cada opção. Dos resultados, é feita a sua avaliação comparando com os critérios traçados no início deste procedimento. Caso não sejam satisfatórios, rever-se-ão as opções e os testes efectuados, procurar-se-ão alternativas e haverá uma reavaliação. Quando todos os parâmetros e opções forem seleccionados, inicia-se o procedimento final no qual é feito um modelo físico: o protótipo do produto (procedimento 6). Este é testado e a sua resposta é avaliada, qualitativa e quantitativamente em relação às especificações, requisitos e exigências definidos no procedimento 2, para o qual foi concebido. Entre outros aspectos, implica uma análise estatística do seu desempenho (repetibilidade, fiabilidade, variabilidade).

Os procedimentos acima referidos são expostos de forma sequencial, no entanto, a sua ordem pode ser alterada, visto que à medida que se avança no projecto, aumenta o conhecimento associado a este, o que pode levar à redefinição dos requisitos e exigências, à redefinição dos conceitos, à redefinição das especificações técnicas, ou à redefinição do próprio protótipo. Logo, o processo de concepção deve ser considerado iterativo, flexível e de constante refinação e optimização. Note-se que os próprios procedimentos 4 e 5 são essencialmente iterativos.

4. PROJECTO DE CONCEPÇÃO

A partir da avaliação inicial pode-se definir o conceito base para o novo instrumento. O instrumento é um dispositivo médico de medição, que tem de ser capaz de medir 25 pontos marcados na superfície das costas das pacientes. Este tem uma base na qual estas se vão posicionar, encontrando-se numa postura/posição erecta. A essa base é acrescida uma estrutura que suporta 25 unidades de contacto. Cada uma dessas unidades contacta um dos pontos marcados e a partir destas determina-se a posição tridimensional de cada um dos 25 pontos de contacto.

4.1 Reconhecimento duma necessidade

O percurso desenvolvido para a apresentação da sugestão de construção de um novo instrumento, enquadra-se já no procedimento 1 do processo de concepção acima definido.

O desconhecimento da existência de um método que determine a posição tridimensional da coluna vertebral em mulheres grávidas na posição erecta, sem comprometer a sua segurança, origina o interesse pelo desenvolvimento de um novo método. Este procura determinar a posição da coluna vertebral a partir da superfície do tronco (pele), mais concretamente, da extremidade posterior da apófise espinhosa de cada uma das vértebras que compõem a coluna vertebral. Essa extremidade é marcada com um ponto (ponto marcado), sobre a pele, por um profissional de saúde especializado. É então necessário um instrumento que meça a posição de cada um desses pontos marcados. Mais uma vez, não se encontrou nenhuma opção que fosse viável e que respeitasse a segurança das mulheres grávidas. A janela de oportunidade criada por esta necessidade origina o projecto de concepção de um instrumento que determine a posição tridimensional dos pontos marcados, respeitando as questões de segurança associada ao grupo populacional a ser medido.

4.2 Definição de especificações, requisitos e exigências

O instrumento, desenvolvido com o projecto de concepção, é destinado à medição de pontos marcados na superfície posterior do tronco de um grupo populacional específico, sendo manipulado por um profissional especializado. Ambos têm de ser considerados como os destinatários do instrumento. O grupo populacional específico é constituído por mulheres que estejam no período gestacional. A manipulação do instrumento e a medição serão feitas por um profissional da área de saúde, particularmente fisioterapeutas.

Uma questão primordial em qualquer dispositivo é a segurança associada aos indivíduos que interagem com este. Consoante as opções técnicas utilizadas, assim se tem de avaliar os seus efeitos nas mulheres grávidas e respectivos embriões/fetos, no profissional que manipula o instrumento e em qualquer outra pessoa que possa ter contacto com instrumento, mais concretamente, no

ambiente (sala, consultório, laboratório, etc.) onde este estiver instalado. Como já foi referido anteriormente, durante a gestação, tanto as mulheres grávidas como os embriões/fetos, são muito mais sensíveis ao ambiente circundante como, por exemplo, à radiação ionizante e possivelmente a outros tipos de radiação electromagnética. Consequentemente, uma das exigências do instrumento é que este não seja uma fonte de qualquer tipo de radiação – tipicamente utilizadas em métodos auxiliares de diagnóstico – que possa induzir qualquer efeito na mãe ou no feto/embrião. Como resultado, este projecto de concepção deve basear-se em técnicas e princípios mecânicos, ou seja, deve ser um protótipo mecânico. Outra propriedade importante a nível da segurança é a biocompatibilidade dos materiais das componentes do instrumento que interagem fisicamente com as pessoas anteriormente referidas

O objectivo concreto do instrumento é a determinação da posição tridimensional relativa de 25 pontos marcados, previamente, na superfície posterior do tronco de indivíduos pertencentes ao grupo populacional acima descrita. Estes pontos correspondem às extremidades posteriores das apófises espinhosas de um conjunto de vértebras (de C1 a S1), extremidades essas que se encontram directamente sob a pele. Por corresponderem a estruturas anatómicas, as medições efectuadas para determinar a posição tridimensional desses pontos são antropométricas. Genericamente, este tipo de medidas enquadra-se num intervalo estatístico de valores. A variabilidade definida por esse intervalo determina qual o volume de medição do instrumento, ou seja, qual o conjunto de pontos tridimensionais (volume) que o instrumento tem de ser capaz de determinar a sua posição tridimensional (medição). O volume de medição do instrumento é um requisito essencial na definição das suas especificações. Um estudo antropométrico prévio realizado por Quaresma [51] definiu estatisticamente, com um intervalo de confiança de 99%, a variabilidade de um conjunto de parâmetros antropométricos associados ao grupo populacional em estudo. Este estudo é a referência para a definição do volume de medição do instrumento. Com base nele, relativamente às apófises espinhosas, define-se que o instrumento tem de ser capaz de medir: (1) o desvio lateral inserido no intervalo de valores [-30 mm; +30 mm]; (2) a variação de profundidade (direcção antero-posterior) inserida no intervalo de valores [0 mm; 14,33 mm] e a altura inserida no intervalo de valores [760 mm; 1740 mm]. Este também define uma área posicionamento da pessoa a ser avaliada de 400 mm x 400 mm. O volume de medição do instrumento é então de 150 mm na direcção associada à direcção antero-posterior, 60 mm da direcção lateral-medial e 1000 mm em altura. Este volume de medição inicia-se a 760 mm da superfície onde se encontra a pessoa a ser avaliada.

Em termos da medição, há duas exigências técnicas. A primeira é a quantificação do erro associado à medição, a qual tem de ter um volume cúbico de $(\pm 1) \text{ mm}^3$. A segunda é a mediação “simultânea” dos pontos, ou seja, a existência de unidades de contacto, uma para cada ponto marcado. Cada um destes últimos está disposto a distâncias variáveis dos pontos marcados

adjacentes, as quais dependem da apófise da vértebra a que correspondem, entre outros parâmetros. Ou seja, na região lombar a distância entre esses pontos é maior que na região torácica que, por sua vez é maior que a distância na região cervical da coluna vertebral. Do estudo acima referido, determinou-se que a coluna vertebral com menor comprimento tinha 390 mm. Se vão ser medidas 25 vértebras então o valor médio da distância entre pontos marcados será de 15,6 mm.

O instrumento necessita também de uma plataforma horizontal na qual as mulheres grávidas se posicionam, sem calçado. A plataforma tem de ter uma área livre mínima de 400 mm x 400 mm para a pessoa avaliada se posicionar. A superfície da face superior desta plataforma tem de ser adequada a esta condição, ou seja, bioinerte, confortável e pouco compressível para não comprometer a medição.

O instrumento deve apresentar uma relativa facilidade de aplicação e de execução das medições controladas por parte do profissional de saúde.

4.3 Criação de ideias para a concepção do instrumento

A enumeração das especificações e das exigências relativas ao instrumento constrói a base para o desenvolvimento de ideias capazes de corresponderem às referidas especificações e exigências. Estas ideias são esboços, denominados de conceitos, que são desenvolvidos até à definição da concepção (ou desenho) final do instrumento. Logo, numa primeira fase, é necessário definir conceitos base que formem a concepção inicial do instrumento.

4.3.1 A Teoria de Sistemas

O projecto de um instrumento tem diferentes e diversos conceitos associados ao cumprimento dos objectivos do próprio instrumento, incluindo o seu funcionamento e respectivos problemas. Pahl [53] apresenta a teoria de sistemas como um método de caracterização destes objectivos e respectivos conceitos. Cada peça, mecanismo, montagem ou parte do dispositivo, desenvolvidos através do projecto de concepção, podem ser definidos como um sistema. Este é caracterizado pelo fluxo (entrada e saída) de materiais, energia e/ou informação. Os materiais estão associados a qualquer matéria-prima ou produto que seja utilizado no sistema (entrada) ou resultante do sistema (saída). A energia é a fonte que permite alterar o material e a informação, podendo também ser transformada por estes. A informação inclui todos os dados associados à monitorização e controlo do sistema (ou dos seus parâmetros característicos). Num instrumento de medição a informação é o parâmetro principal de saída, representante da aquisição de dados (medições). Os parâmetros de entrada são o instrumento em si (material) e a energia utilizada para manusear o instrumento para que se consiga fazer a medição (energia)

A separação de um dispositivo em diferentes sistemas pode basear-se em diferentes perspectivas: ser de acordo com a função, montagem ou produção, comum a um grupo de elementos do dispositivo [53]. Os sistemas existem a vários níveis e um sistema é resultante da agregação de vários subsistemas, sendo o sistema principal o instrumento em si. Num projecto de concepção, a perspectiva funcional é a mais relevante para o desenvolvimento de conceitos, pois pretende-se definir e construir um dispositivo capaz de executar uma determinada função. As outras perspectivas são mais direccionadas para o desenvolvimento de conceitos associados aos projectos de produto, nos quais se optimizam os processos, a sequência de fabrico, a organização da estrutura industrial, entre outros aspectos.

4.3.2 Os sistemas base do instrumento

A definição dos conceitos base da concepção do instrumento implica a definição prévia dos sistemas base da concepção do instrumento.

O sistema funcional principal do instrumento está directamente relacionado com a própria função para a qual este foi concebido: determinação da posição tridimensional de 25 pontos marcados na superfície posterior do tronco de um grupo populacional de mulheres grávidas ou no período pré ou pós gestação. Este, por sua vez, pode ser dividido em cinco sistemas. O primeiro sistema concentra-se na interacção do instrumento com o indivíduo, mais concretamente, a sonda de contacto (sistema de contacto). O segundo sistema providencia o movimento, o controlo e o suporte da sonda, ou seja, o posicionamento da sonda (sistema de controlo). O terceiro sistema está relacionado com a quantificação da posição de cada ponto, ou seja, o sistema de medição, representado tipicamente por réguas, goniómetros, mostrador de sensores, escalas, etc. (sistema de medição). O quarto sistema fornece suporte aos sistemas de posicionamento da sonda e de suporte da medição, tipicamente uma estrutura (sistema de suporte). O quinto sistema permite o posicionamento da pessoa avaliada, à qual é aplicado o instrumento (sistema de posicionamento).

Estes sistemas funcionais não são partes físicas independentes do instrumento, influenciando-se mutuamente, ou seja, os conceitos definidos num dos sistemas influenciam os conceitos dos outros sistemas.

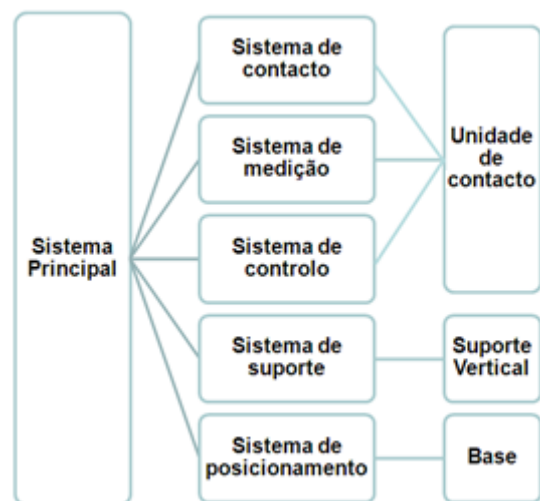


Figura 4.1 – Sistemas do instrumento

4.3.3 Conceitos associados aos sistemas base da concepção do instrumento

Os conceitos associados a cada sistema são apresentados individualmente.

4.3.3.1 Sistema de Contacto

O sistema de contacto é caracterizado pela sonda. Este é definido (a) pelo contacto propriamente dito do instrumento com o indivíduo a quem vai ser aplicado e também (b) pela interface com o sistema de controlo. A sonda pode apresentar tipicamente uma forma pontiaguda ou uma forma esférica. Podem ainda ser utilizadas outras formas, caso as primeiras não satisfaçam os requisitos.

4.3.3.2 Sistema de controlo

O sistema de controlo tem de assegurar o movimento, suporte e controlo da sonda de contacto. Esta última encontra-se apoiada numa estrutura mecânica, com elementos dinâmicos (carros, patins, casquilhos) que se movimentam ao longo de elementos estáticos (carris, guias lineares, veios). O accionamento destes movimentos pode ser efectuado por elementos de tracção (engrenagens, fusos, correias, correntes). Os elementos de tracção podem, por sua vez, ser accionados de forma manual (manípulos) pela aplicação de força por parte do utilizador, de forma semi-automática com motores com controlo manual (também controlado pelo utilizador) ou ainda de forma automática (motores controlados computadorizadamente, auxiliados por um sistema de sensores). Alternativamente, o accionamento e controlo global do movimento dos elementos dinâmicos podem ser feitos pela mão do utilizador, com uma pega acoplada directamente à sonda, apoiada pela estrutura mecânica e respectivos elementos estáticos e dinâmicos [54-57].

A posição tridimensional de qualquer ponto pode ser definida e quantificada pelas suas coordenadas. Utilizando estes princípios geométricos, se a estrutura mecânica for concebida tendo em consideração um referencial, pode-se determinar a posição da sonda a partir da posição relativa dos elementos dessa estrutura mecânica. Ou seja, como a posição da sonda de contacto está dependente dos elementos da estrutura mecânica, se

se souber a posição de cada um desses elementos em relação a um referencial, pode-se determinar a posição da sonda. Assim sendo, com esta configuração pode-se englobar o sistema de controlo e o suporte para o sistema de medição, num só. O conjunto das coordenadas cartesianas é considerado o mais simples e o mais intuitivo. No entanto, existem outros conjuntos de coordenadas que

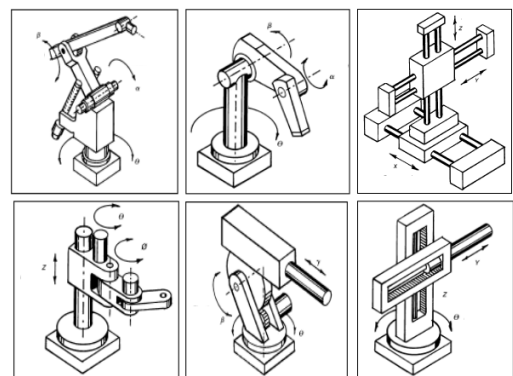


Figura 4.2 – Conceitos de Máquinas de medição de coordenadas[58]

facilitam o cálculo geométrico em certas circunstâncias, comparativamente com as coordenadas cartesianas [59]

Associado à estrutura mecânica, pode-se definir um conjunto de coordenadas que permitam a determinação da posição tridimensional dos pontos marcados. Estes conceitos são amplamente utilizados em máquinas de medição de coordenadas. De uma forma genérica, a estrutura mecânica pode ter três formatos: só permite movimentos de translação rectilínea, só permite movimentos de rotação ou permite os dois tipos de movimento. Dois exemplos são: i) uma máquina de medição de coordenadas cartesiana que permita que a sonda de contacto só execute movimentos de rotação em torno de si própria ou sobre uma das suas extremidades; ii) um braço digitalizador no qual um dos elementos é telescópico permitindo que a sua extremidade faça um movimento de translação. Nestes casos, o número de graus de liberdade costuma estar associado à agilidade e capacidade de movimento da sonda suportada pela estrutura mecânica.

4.3.3.3 Sistema de medição

Os sistemas de medição associados a cada um destes tipos de movimentos – rotação e translação rectilínea – são distintos.

Nos movimentos translacionais rectilíneos medem-se distâncias, podendo-se usar escalas (régua) com uma resolução de 1 mm ou 0.5 mm. Se for acrescentado um nónio, o valor da resolução pode diminuir até 0,05 mm [60]. Alternativamente podem-se usar sensores (ultra-sónicos, laser, magnéticos), nos quais a resolução pode assumir um valor inferior. Mas associados a estes há um aumento de custos e, possivelmente, da complexidade técnica.

Nos movimentos rotacionais são medidas variações angulares, utilizando instrumentos como goniómetros. Todas as medições são dependentes da posição do centro de rotação do movimento. A resolução da medição angular é tipicamente de 1º, podendo também ser acrescentado um nónio de forma a diminuir o valor da resolução. A visualização da escala é mais fácil quanto maior for a circunferência onde esta estiver inserida. Alternativamente, podem-se usar sensores (ultra-sónicos, de laser, magnéticos, etc.), os quais podem ter uma resolução com valor menor. Mas, como foi referido anteriormente, implicam sempre um aumento de custos e, possivelmente, um aumento de complexidade técnica.

4.3.3.4 Sistema de suporte

O sistema de suporte está directamente dependente do sistema de controlo, pois a sua função é sustentar este último. Consequentemente, o conceito associado a este sistema é uma estrutura. O seu desenvolvimento será considerado posteriormente.

4.3.3.5 Sistema de posicionamento

O sistema de posicionamento tem como objectivo assegurar o posicionamento da pessoa avaliada e suportar todos os outros sistemas do instrumento. Este é dividido em dois aspectos: as suas características geométricas (forma, dimensões, contacto com o solo) e a interface com os pés da pessoa avaliada que se posiciona sobre o dito sistema. Este último pode ser constituído por uma plataforma horizontal, tendo a sua superfície superior uma forma quadrangular, rectangular, circular ou outra conforme se considere mais adequado. A plataforma pode estar directamente em contacto com o solo ou ter apoios. Os apoios podem ser reguláveis verticalmente e podem permitir o deslocamento da plataforma (rodas). A superfície de contacto com os pés da pessoa avaliada a quem se vai aplicar o instrumento pode ter um revestimento aplicado sobre a plataforma, podendo ser composto por diferentes materiais. Os materiais mais aplicados em solos de ambiente clínico são os polímeros e os co-polímeros como tapetes de chão de borracha sintética ou de esponja.

4.4 Avaliação dos conceitos apresentados

A exposição dos diferentes conceitos, feita na secção anterior, exige uma comparação destes com os requisitos definidos previamente, para além de uma comparação entre si, para se poder seleccionar quais os conceitos que continuam a ser explorados.

4.4.1 Sistema de contacto

No sistema de contacto, a extremidade da sonda de contacto representa a área de superfície de contacto com os pontos marcados. Esta tem de estar contida num quadrado com 1 mm^2 de área e não pode ferir a pessoa avaliada. Opta-se por uma sonda de forma pontiaguda com uma área de superfície de contacto em forma de círculo com 1 mm de diâmetro, porque a visualização do contacto entre a sonda e o ponto marcado não está limitada pelas suas dimensões e a sua extremidade não fere a pessoa avaliada pela visão do utilizador do instrumento.

4.4.2 Sistema de controlo

Os conceitos criados para o sistema de controlo resultam da sugestão da definição de uma estrutura mecânica, com uma componente estática e outra dinâmica. Esta também deve permitir a associação com o sistema de suporte da medição. Os requisitos e as exigências inerentes ao sistema de controlo são: a medição da posição de cada um dos 25 pontos tem de ser feita por uma unidade de contacto independente; o sistema tem de ter o mínimo de complexidade possível. A medição independente de cada ponto impõe que uma unidade de contacto não esteja limitada pela localização das outras unidades de contacto, enquanto a primeira se posiciona para poder contactar o ponto marcado que tem de medir. Dos requisitos sabe-se que cada unidade de contacto pode ter

um valor máximo de 15 mm de altura. As diferentes estruturas propostas são influenciadas pelo objecto de medição (a ser medido). Os pontos a medir encontram-se na superfície posterior do tronco, de fácil acesso quando abordados pela sonda de contacto no sentido posterior-anterior ao longo do plano sagital. A estrutura mecânica com movimentos unicamente lineares requer 3 graus de liberdade para poder posicionar a sonda correctamente, relativamente ao ponto marcado. A medição associada a cada movimento pode ser feita por uma escala linear graduada, de fácil visualização.

As estruturas mecânicas com graus de liberdade associados a movimentos rotacionais não se adequam tão facilmente a um conjunto de unidades de contacto paralelas, independentes e a funcionar em simultâneo. As restrições dimensionais das referidas unidades de contacto originam uma proporcionalidade inversa entre a liberdade rotacional articular e a dimensão dos braços, nos movimentos nos planos verticais (frontal e sagital). Também há uma maior dificuldade na medição das variações angulares, quando se utilizam instrumentos que executam a medição por comparação com escalas graduadas impressas ou gravadas. Em sensores ligados a interfaces de recolha de dados esta questão não se coloca, mas os custos destes sistemas são muito mais elevados comparativamente com os outros instrumentos referidos na frase anterior, especialmente se aplicados a 25 unidades. Após esta análise, considera-se mais simples a utilização de um sistema cartesiano para cada unidade de contacto, permitindo apenas movimentos translacionais rectilíneos e, de preferência, sem recorrer a sensores devido ao seu custo e à sua complexidade técnica.

4.4.3 Sistema de medição

O sistema de medição analisa e quantifica as variações de posição dos elementos do sistema de controlo, relativamente a cada um dos três eixos cartesianos. Na secção 4.3.3.3 foram apresentados os conceitos mais típicos para estes sistemas. No entanto, a sua selecção é mais adequada após, ou durante, a definição dos conceitos associados aos elementos do sistema de controlo, pois a selecção do sistema de medição vai depender da selecção deste último.

4.4.4 Sistema de suporte

O conceito em torno do sistema de suporte será definido, tal como foi referido em 4.3.3.4, aquando do desenvolvimento detalhado do sistema de controlo.

4.4.5 Sistema de posicionamento

O sistema de posicionamento tem de permitir a colocação livre e segura da pessoa avaliada. A posição da plataforma deve ser regulável, para se conseguir diminuir o efeito de possíveis desníveis no solo onde este se encontre. Consequentemente, esta plataforma tem de estar assente num

conjunto de apoios, reguláveis ao longo de um eixo vertical. Em termos dimensionais é sugerida uma área de posicionamento mínima de 400 mm x 400 mm. Considera-se a forma quadrangular como a mais adequada para a face superior da plataforma, pois é a forma menos exigente a nível de maquinaria, considerando a dimensão da plataforma. Sobre esta face deve ser aplicado um tapete confortável para a pessoa avaliada e adequado a um ambiente clínico. Tipicamente, este tipo de tapetes é composto por um co-polímero de borracha sintética.

4.5 Desenvolvimento e optimização detalhados do instrumento

Na selecção dos conceitos principais para os sistemas de contacto, de posicionamento e medição opta-se pela utilização de um sistema cartesiano para cada unidade de contacto, permitindo apenas movimentos translacionais rectilíneos. Cada unidade de contacto apresenta a quantificação de 3 dimensões: uma para cada um dos três eixos que definem o referencial. À quantificação da dimensão em cada eixo, estão associados um padrão de referência e um marcador referente à posição da sonda nesse eixo. O sistema de medição determina a distância entre ambos. Logo, o sistema de medição de cada unidade de contacto determina o valor de 3 distância em direcções perpendiculares entre si.

De uma forma genérica, pode-se afirmar que a sonda de cada unidade de contacto executa três movimentos: dois ao longo dos eixos horizontais (perpendiculares entre si) e um ao longo do eixo vertical. Este último é definido como eixo Z. O eixo horizontal na direcção antero-posterior é definido como eixo X e o eixo horizontal na direcção medial-lateral como eixo Y. Para facilitar a nomenclatura em termos de concepção e definição dimensionais dos diferentes elementos e estruturas das unidades de contacto, opta-se por se usar os termos “comprimento”, “largura” e “altura” para definir dimensões nos eixos X, Y e Z, respectivamente. Para a comparação da posição de duas estruturas ao longo de cada um dos eixos utilizam-se os termos: “superior” e “inferior” relativamente ao eixo Z; “esquerda” e “direita” para o eixo Y; “anterior” e “posterior” para o eixo X. Uma estrutura numa posição mais superior encontra-se mais afastada do solo e uma estrutura numa posição mais inferior encontra-se mais próxima do solo. Uma estrutura numa posição mais à esquerda encontra-se também mais próxima dos membros esquerdos do paciente e uma estrutura numa posição mais à direita encontra-se mais próxima dos membros direitos do paciente. Uma estrutura numa posição mais anterior encontra-se mais próxima do ponto marcado no tronco do paciente e uma estrutura numa posição mais

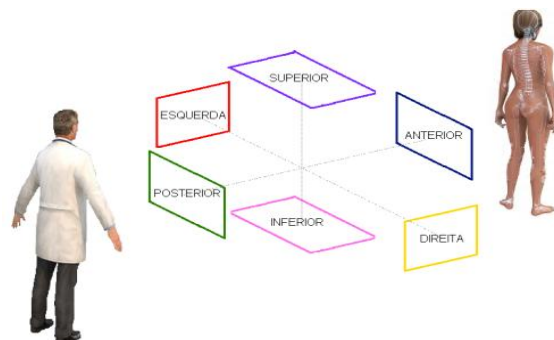


Figura 4.3 - Posicionamento relativo do instrumento

posterior encontra-se mais afastada do ponto marcado no tronco do paciente.

4.5.1 Sequência dos 3 eixos

É necessário definir uma sequência relativamente aos três eixos, para se poder desenvolver os detalhes dos conceitos associados ao sistema de controlo. Como os objectivos deste sistema são apenas o posicionamento da sonda e a respectiva quantificação, o critério de sequenciação é unicamente dimensional. A gama de intervalo de medição maior é no eixo Z (1000 mm), intermédia no eixo X (150 mm) e, por fim, menor no eixo Y (60 mm). Opta-se pela sequenciação eixo Z – eixo Y – eixo X. A diferença significativa (dimensionalmente) do eixo Z, em relação aos outros dois eixos, sugere o desenvolvimento de uma estrutura comum as todas as unidades de contacto e que permita o deslocamento das unidades de contacto no dito eixo Z. O deslocamento nos outros eixos tem de ser providenciado por cada unidade de contacto individualmente. Relativamente ao eixo X e ao eixo Y, os elementos associados ao movimento no eixo Y estão centrados na unidade de contacto e, por apresentar uma gama de intervalo de movimento de 60 mm, é possível que este esteja totalmente apoiado sobre a unidade de contacto sem aumentar amplamente as dimensões desta última. Por outro lado, os elementos associados ao movimento do eixo X podem ter uma estrutura simples, pois apenas têm de providenciar suportar à sonda. Este factor é maximizado, por ser possível adaptar a extremidade anterior do elemento dinâmico do eixo X, de forma a incluir as propriedades exigidas à sonda, acrescentando as funções do sistema de contacto aos elementos associados ao movimento do eixo X. Ou seja, este elemento pode ter largura e altura reduzidas comparativamente ao seu comprimento e ter ainda uma forma pontiaguda na sua extremidade anterior, como exigido pelo conceito seleccionado para a sonda de contacto, diminuindo a complexidade da unidade de contacto. Assim sendo, este é o conceito eleito para a unidade de contacto. Note-se que a definição da sequenciação dos eixos, não implica que, nesta fase, estes estejam constrictos a uma configuração específica ou dispostos por blocos uns sobre os outros. No entanto, visto conceber-se um sistema de cada vez, opta-se por pré-definir o valor máximo de 5 mm altura para os componentes associados a todos os sistemas de cada eixo. Este valor é apenas de referência, pois se a altura definida nos sistemas associados a um dos eixos for menor que 5 mm, então outro eixo poderá ser maior que 5 mm em altura.

Resumindo, os sistemas de posicionamento, de contacto e de medição são representados por 25 unidades de contacto, as quais se deslocam verticalmente ao longo de uma estrutura comum a todas. Cada unidade de contacto contém elementos que permitem a execução de movimentos ao longo do eixo Y, apoiados na sua estrutura. Sobre os elementos associados ao eixo Y encontram-se os elementos associados ao eixo X, com um elemento de comprimento alongado sobre esse eixo, tendo a sua extremidade uma forma pontiaguda que estabelece o contacto com o ponto marcado (sonda).

A definição do conceito associado à sequenciação dos eixos, permite construir o conceito associado ao sistema de suporte. Este pode ser caracterizado por uma estrutura que sirva de base ao sistema de controlo, mais concretamente, uma estrutura comum a todas as unidades de contacto. A sua altura é definida desde o solo ou desde o sistema de posicionamento até à altura correspondente ao início da gama de intervalo de medição no eixo Z. O seu comprimento, a sua largura e a sua forma tridimensional estão dependentes das propriedades necessárias para suportar as unidades de contacto.

Para além destas características, o sistema de suporte pode estar apoiado no solo ou no sistema de posicionamento. Esta última opção facilita a definição do referencial de coordenadas visto que, tanto o indivíduo como as estruturas que permitem a medição dos pontos marcados, encontram-se no mesmo referencial, ou seja, na estrutura de posicionamento da pessoa avaliada.

4.5.2 As unidades de contacto

As unidades de contacto estão associadas a três sistemas funcionais diferentes dos anteriormente definidos. Para cumprirem as funções associadas a cada um deles, é necessário decompô-las em subsistemas e desenvolver os respectivos conceitos.

4.5.2.1 Os sistemas das unidades de contacto

Cada unidade de contacto tem, relativamente a cada eixo: (1) o sistema de guiamento, (2) o sistema de tracção, (3) o sistema de travagem e (4) o sistema de medição e o (5) sistema de contacto.

O sistema de contacto da unidade de contacto é o mesmo que o sistema de contacto do instrumento, ou seja, a sonda de contacto com a extremidade pontiaguda.

O sistema de guiamento permite o movimento dos elementos relativos ao

respectivo eixo, posicionando a sonda de contacto no ponto marcado correspondente. O sistema de tracção permite o controlo da amplitude e velocidade do referido movimento, até à posição pretendida para a sonda de contacto relativamente a esse eixo. A manutenção da posição pretendida é assegurada pelo sistema de travagem. Por fim, através do sistema de medição, é determinada a posição (coordenada), associada a cada eixo da sonda de contacto.

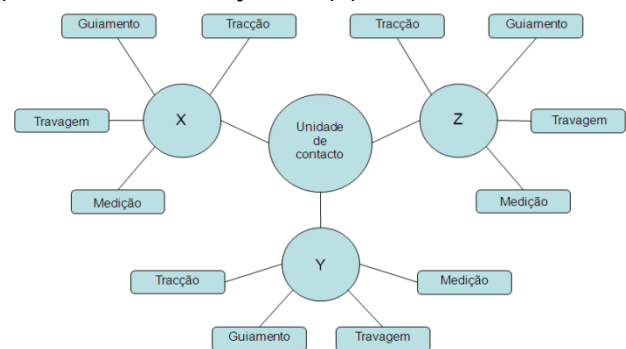


Figura 4.4 - A Unidade de contacto

Diferentes estratégias podem ser usadas para construir os conceitos relativos a cada um destes sistemas para cada um dos eixos. São apresentados os conceitos mais adequados para todos os sistemas, eixo a eixo, seguindo a sequência estabelecida anteriormente, “eixo Z – eixo Y – eixo X”.

No Apêndice IV são apresentados genericamente os elementos tipicamente utilizados nos sistemas referidos.

4.5.2.4 Resumo dos sistemas seleccionados

A sugestão de vários conceitos para cada sistema é extensa, apesar de importante para o desenvolvimento de ideias. No entanto, por uma questão de síntese considera-se mais relevante a apresentação de todas as opções seleccionadas para os diferentes sistemas dos diferentes eixos da unidade de contacto e o desenvolvimento dos conceitos associados.

Nos próximos parágrafos são apresentados os conceitos seleccionados. Para o eixo Z, o sistema de tracção é caracterizado por um mecanismo de engrenagem pinhão-cremalheira, no qual o pinhão de cada unidade de contacto, com um manípulo acoplado, rola ao longo de uma cremalheira comum a todas as unidades de contacto. O sistema de guiamento é constituído por um sistema de veios e chumaceiras de casquilho, no qual os casquilhos de cada unidade de contacto deslizam ao longo dos veios, comuns a todas as unidades de contacto. O sistema de travagem utiliza um mecanismo de calço, accionado por um parafuso disposto da face lateral direita da unidade de contacto, presente em cada unidade de contacto. O sistema de medição é caracterizado por uma régua disposta paralelamente à cremalheira do sistema de tracção deste eixo, usando a face superior da unidade de contacto como referência da posição de cada unidade de contacto.

Todos os sistemas do eixo Y estão presentes em cada unidade de contacto e de forma independente entre estas. O sistema de tracção é constituído por um fuso, fixo em relação ao seu eixo longitudinal, com um manípulo numa extremidade e inserido num furo roscado que passa pelo interior da componente estática do sistema de guiamento do eixo Y. O sistema de guiamento é caracterizado por um mecanismo de carril e placa de guia, associadas às componentes estática e dinâmica, respectivamente. O sistema de travagem não tem mecanismo independente, sendo o sistema de tracção deste eixo a executar as suas funções. O sistema de medição é constituído por uma régua disposta na face lateral posterior da unidade de contacto, utilizando a face lateral sem dentes da cremalheira do eixo X como referência da posição da sonda de contacto neste eixo.

Os sistemas do eixo X, tal como os sistemas do eixo Y, são independentes entre as diferentes unidades de contacto. O sistema de tracção é definido por um mecanismo de engrenagem pinhão-cremalheira com dois pinhões (com os seus eixos de rotação dispostos na posição vertical) e uma cremalheira disposta ao longo do eixo X. O pinhão mais posterior também funciona como manípulo, controlando a transmissão de movimento entre os pinhões e a cremalheira. O sistema de guiamento é caracterizado por uma chumaceira com um furo de forma quadrangular fechada, ao longo da qual passa a cremalheira. Uma das faces laterais é constituída pelos dois pinhões do sistema de tracção

deste eixo, a outra face lateral é constituída por uma estrutura rectilínea, a face inferior é constituída pela face superior da componente dinâmica do sistema de guiamento do eixo Y e a face superior é constituída por uma estrutura de espessura diminuta apoiada nas duas faces laterais. O sistema de travagem não tem mecanismo próprio e as suas funções são cumpridas pelo sistema de tracção em conjunto com o sistema de guiamento, ambos do eixo X. O sistema de medição é constituído por uma escala acoplada à cremalheira do sistema de tracção deste eixo, utilizando a face lateral posterior da unidade de contacto como referência para medição da coordenada associada a este eixo.

4.5.2.5 Estrutura da unidade de contacto

Para finalizar a concepção inicial da unidade de contacto é necessário definir a sua estrutura, a qual vai sustentar todos os sistemas seleccionados. Como a unidade de contacto tem de servir de suporte aos três sistemas, o seu desenho já está parcialmente definido pela selecção feita, como se pode verificar, à medida que se foram seleccionando os conceitos mais adequados a cada um dos sistemas da unidade de contacto.

A estrutura da unidade de contacto é separada em 3 níveis, um para cada eixo. Daí denominar-se: o nível do eixo Z por nível Z; o nível do eixo Y por nível Y e o nível do eixo X por nível X.



Figura 4.5 - Estrutura da unidade de contacto

4.5.2.5.1 Nível Z

O nível Z da unidade de contacto cumpre a função de suporte do nível Y e dos sistemas do eixo Z. Numa definição mais concreta, o nível Z corresponde à componente dinâmica do sistema de guiamento do eixo Z. É caracterizado por duas regiões:

- A região A, com 15 mm de altura onde se localizam os casquilhos do sistema de guiamento do eixo Z, o pinhão do sistema de tracção do eixo Z e ainda o parafuso e o calço do sistema de travagem do eixo Z. Esta região suporta a região B do seu nível. A largura e comprimento desta região são definidos pelas dimensões necessárias para englobar toda a estrutura que suporta as unidades de contacto, ou seja, os furos e respectivos casquilhos para a passagem dos veios do sistema de guiamento do eixo Z e ainda um outro furo para a passagem da cremalheira do sistema de tracção do mesmo eixo, da régua graduada do sistema de medição também do eixo Z e da estrutura que suporta estes dois últimos elementos.

- A região B, com uma altura igual ou inferior a 5 mm, fornecendo suporte estrutural ao nível Y, mais concretamente funcionando como componente estática do sistema de guiamento do eixo Y. A

largura e o comprimento desta região são definidos pelas características inerentes à componente estática do sistema de guiamento do eixo Y, dependentes das dimensões e movimento da componente dinâmica do mesmo sistema.

4.5.2.5.2 Nível Y

O nível Y da unidade de contacto cumpre a função de suporte do nível X e dos sistemas do eixo Y. Numa definição mais concreta, o nível Y corresponde à componente dinâmica do sistema de guiamento do eixo Y. Este encontra-se apoiado na face superior da componente estática do mesmo sistema, correspondendo este último à região B do nível Z. O nível Y tem uma altura igual ou inferior a 5 mm, consoante o diâmetro do furo roscado que recebe o fuso do sistema de tracção do eixo Y. Note-se que o fuso do sistema de tracção do eixo Y tem que estar apoiado na componente estática do sistema de guiamento deste eixo. O comprimento e a largura mínimos do nível Y são definidos pelo nível X e pelas dimensões exigidas à componente dinâmica do sistema de guiamento do eixo Y que garantam o desempenho exigido a este último sistema.

4.5.2.5.3 Nível X

O nível X da unidade de contacto cumpre a função de suporte dos sistemas do eixo X. Numa definição mais concreta, o nível X corresponde à componente estática do sistema de guiamento do eixo X. Este encontra-se apoiado na face superior do nível Y. O nível X tem uma altura igual ou inferior a 5 mm. O seu comprimento é definido pela área de apoio constante que a cremalheira do sistema de tracção do eixo X necessita e pela distância entre os pinhões do mesmo sistema. A sua largura é definida pela distância necessária ao suporte da parede do elemento estático do sistema de guiamento do eixo X que apoia a cremalheira, da cremalheira em si e dos respectivos pinhões.

4.5.3 Conceitos do sistema base ainda não definido – o sistema de suporte

O sistema de suporte providencia apoio estrutural às unidades de contacto e respectivos elementos dos sistemas do eixo Z comuns a todas elas. Mais concretamente, esses elementos são a cremalheira do sistema de tracção do eixo Z e os veios incluídos na componente estática do sistema de guiamento também do eixo Z. Além disso, estes elementos têm de estar dispostos paralelamente ao eixo Z, numa posição em que a face inferior de cada um destes elementos se encontre a 750 mm da face superior da plataforma de posicionamento da pessoa avaliada e a face superior a 1760 mm da plataforma de posicionamento da pessoa avaliada. Daí o sistema de suporte ter duas estruturas distintas: uma região I (inferior), que posiciona os elementos acima referidos, relativamente ao eixo Z; uma região S (superior), que fixa os elementos acima referidos à região I.

Considera-se que o sistema de suporte tem de ser fixo directamente na região posterior da plataforma do sistema de posicionamento. Visto que a região S tem de posicionar a cremalheira, os veios e a régua graduada dos sistemas do eixo Z das unidades de contacto e todos apresentam o mesmo comprimento, sugere-se que esta região seja formada por duas placas horizontais fixas a cada uma das faces da base e do topo da cremalheira e dos veios, para além de uma estrutura central que forneça apoio à cremalheira e que contemple a fixação da régua graduada do sistema de medição do eixo Z das unidades de contacto. A região I tem de suportar toda esta estrutura, por isso, opta-se uma estrutura única para esta região, mais concretamente um perfil de base rectangular com uma placa horizontal no topo a servir de apoio à base inferior da região S. Considerando que o perfil tem um furo interior a fixação entre as estruturas horizontais e o perfil é feita por espigões inseridos nas extremidades do referido furo interior do perfil. Estes espigões devem assumir uma forma semelhante à forma do furo interior. O espigão inferior deve ser maior que o espigão superior, visto que o primeiro estar fixo a uma estrutura mais rígida e robusta que o segundo e, consequentemente, poder sofrer tensões laterais mais elevadas.

4.5.4 Parâmetros detalhados do instrumento

A selecção dos diferentes conceitos que se pretende aplicar a cada um dos sistemas do instrumento, permite avançar para uma definição mais técnica e específica de cada um desses conceitos (desenvolvimento dos conceitos), rumo à concepção final do instrumento. Entre outros parâmetros, nesta fase são definidas todas as dimensões, materiais e processos de fabrico de todas as peças e elementos do instrumento.

Considerando que as unidades de contacto são peças de importância principal na concepção do instrumento, pois incluem os sistemas de posicionamento, de contacto e de medição, opta-se por apresentá-las primeiro que os outros sistemas do instrumento.

4.5.4.1.1 Sistema de tracção do eixo Z

O sistema de tracção do eixo Z é composto por uma engrenagem pinhão-cremalheira. O pinhão está disposto horizontalmente na unidade de contacto, a qual está limitada em altura, não podendo ter mais de 15 mm. Opta-se por um pinhão com 14 mm de diâmetro, havendo assim $\pm 0,5$

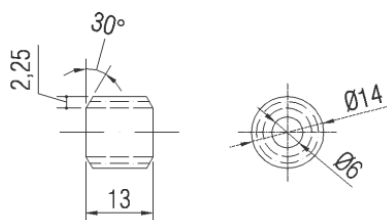


Figura 4.6 - Pinhão vertical

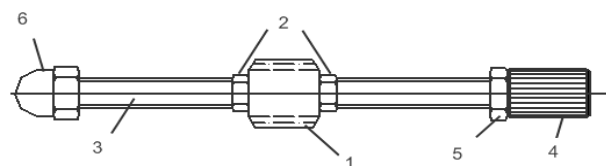


Figura 4.7 – Pinhão Vertical (1), eixo (3) e fixação (2, 4, 5, 6)

mm de tolerância na montagem do pinhão na unidade de contacto, pois considera-se que o pinhão deve ter o maior diâmetro possível para a sua tracção com a cremalheira ser a mais robusta possível. O único modelo encontrado a nível comercial é apresentado pela empresa ATLANTA Drive Systems, Inc . É um pinhão com 14 mm de diâmetro, 15 mm de largura, com um furo central de 6 mm de diâmetro, dentes recto e módulo 1 (norma ISO 54:1977). Numa engrenagem pinhão-cremalheira, o módulo de ambos tem de ter igual. Logo o pinhão é complementado por uma cremalheira, também de módulo 1, com 15 mm de largura e 999 mm de altura. Para completar esta selecção é feito um cálculo, segundo o fabricante, que confirma a adequação do pinhão à aplicação pretendida. Este é apresentado no Apêndice III.

Considera-se também que o controlo do pinhão deve ser feito por tracção manual. O eixo do pinhão tem de ser posicionado paralelamente ao eixo Y e ser controlado a partir da face lateral posterior da unidade de contacto. Opta-se por inserir o pinhão num veio com um manípulo na sua extremidade posterior, para que o seu movimento possa ser controlado pelo utilizador do instrumento. O veio é roscado para que seja possível a fixação do pinhão e do manípulo. É aplicado o conceito de porca/contra-porca (Figura 4.7.2), tanto no pinhão (Figura 4.7.1) como no manípulo (Figura 4.7.4). O furo central do pinhão tem 6 mm de diâmetro. O diâmetro do veio (Figura 4.7.3) roscado deve ser ajustado ao furo, mas a dimensão normalizada de valor maior existente é M6.

A cremalheira tem de ser colocada de acordo com a posição do pinhão e apresentar as características necessárias ao correcto funcionamento desta engrenagem. O seu comprimento mínimo deve ser de 1010 mm (posição 750 mm de altura até 1760 mm de altura), de acordo com os requisitos definidos para o instrumento. Considerando que a posição de pontos marcados próximas dos 750 mm relativamente ao eixo Z representam um percentagem muito diminuta do grupo populacional alvo (a qual apresenta uma distribuição normal), por uma questão de simplificação do instrumento, opta-se por se redefinir a gama do intervalo de medição no eixo Z, estando compreendido entre a posição 800 mm e 1760 mm, ambas no eixo Z. No caso de haver pontos marcados com a sua posição, relativamente ao eixo Z, menor que 800 mm, o indivíduo a ser medido é posicionado sobre uma estrutura suplementar com 100 mm de altura, disposta sobre a plataforma do. A cremalheira é apoiada no sistema de suporte a partir da sua face lateral, oposta à face dentada da mesma.

4.5.4.1.2 Sistema de guiamento do eixo Z

O sistema de guiamento do eixo Z é composto por um conjunto de veios e por um conjunto de casquilhos (com os respectivos furos), os quais compõem as componentes estática e dinâmica deste sistema de guiamento, respectivamente. Para se avaliar o número de veios necessários para o sistema de guiamento, executou-se um ensaio, nos quais foram testadas concepções com 2, 4 e 6 varões (Apêndice III). Das conclusões obtidas a partir deste ensaio opta-se com usar 4 veios com 12 mm de diâmetro e 1008 mm de comprimento (os 8 mm adicionais estão inseridos nas peças do sistema de suporte apresentado posteriormente), que passam por furos maquinados na unidade de contacto sem a utilização de casquilhos. Por não se usarem os ditos casquilhos, considera-se que o diâmetro do veio tem de apresentar uma tolerância dimensional inferior a h9 e um acabamento de superfície com qualidade elevada, mais concretamente, um veio em cromoduro composto por aço C45 revestido por uma camada de 0,020 mm de cromo e rectificado,

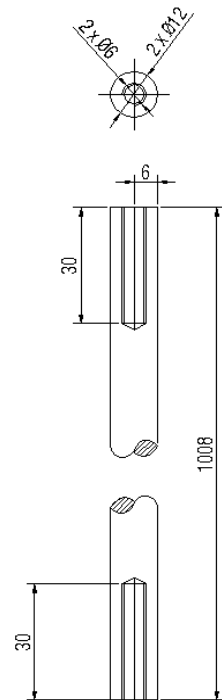


Figura 4.8 - Veios verticais

apresentando uma tolerância dimensional f7 – correspondendo à gama de intervalo de valores entre -0,016 mm e -0,034 mm. Apesar dos dados qualitativos obtidos no ensaio, é necessário verificar analiticamente se os veios estão bem dimensionados. Da aplicação da fórmula de Euler para a flexão de colunas (encurvadura) pode-se concluir que o diâmetro definido para os veios é aceitável.

4.5.4.1.3 Sistema de travagem do eixo Z

O sistema de travagem do eixo Z é caracterizado por um calço controlado por um parafuso. Opta-se por se posicionar o parafuso (e o respectivo furo) axialmente paralelo ao eixo Y, porque a força exercida pelo parafuso deve ser perpendicular a aos planos verticais de atrito que se contactam quando o travão é accionado. O comprimento do parafuso está condicionado essencialmente pela dimensão do furo roscado, o qual depende da forma e dimensão da unidade de contacto. A rotação do parafuso é controlada por um manípulo análogo ao do pinhão do sistema de tracção deste eixo. A sua fixação é feita com uma contra-porca baixa M6 com 3,2 mm de altura, sendo que as duas porcas são apertadas com um alicate de pressão. Esta fixação exige a alteração do parafuso para um veio roscado M6 com 50 mm de comprimento. A posição do furo deve ser central em relação ao eixo Z e ao eixo X na unidade de contacto, visto a estrutura de suporte da cremalheira encontrar-se também centrada em relação a estes eixos.

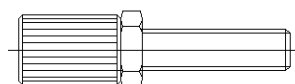


Figura 4.9 – Parafuso do travão do nível Z

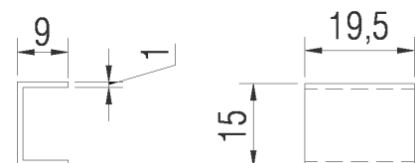
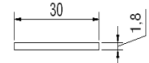


Figura 4.10 – Calço do travão do nível Z

O calço deve ter o mesmo comprimento que a estrutura de suporte da cremalheira decrescida de 0,5 mm (19,5 mm), para que haja uma folga permitindo que o calço se movimente ao longo do eixo Y. A sua altura tem de ser de 14 mm, para que seja garantidamente inferior à altura da unidade de contacto.

4.5.4.1.4 Sistema de medição do eixo Z

O sistema de medição do eixo Z é composto por uma régua graduada com 1000 mm de altura e uma resolução de medição de $\pm 0,5$ mm. Opta-se por uma régua graduada, apresentada pela empresa Medid, S.A., com 1000 mm de altura, 30 mm de largura, 1,8 mm de espessura, a sua escala graduada tem uma resolução de 0,5 mm e um desvio de 0,02 mm por 1000 mm.



A régua é apoiada no sistema de suporte, mais concretamente, na estrutura de suporte da cremalheira. A face com a escala graduada tem ser posterior, posicionada no sentido do utilizador e sem que nenhum dos outros sistemas da unidade de contacto dependa desta. Logo, opta-se por se fixar a régua graduada sobre a face lateral posterior da estrutura de suporte da cremalheira. A régua graduada é utilizada por todas as unidades de contacto, logo, a origem do referencial em relação ao eixo Z é o valor 0,0 mm da régua graduada. A marcação da posição da unidade de contacto é feita pela face superior da unidade de contacto e a leitura é feita pela comparação entre a posição desta última e as marcações da régua graduada, relativamente ao eixo Z. O registo da leitura é feito manualmente pelo utilizador num suporte adequado (folha de cálculo, papel, etc.)

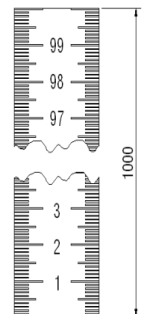


Figura 4.11
- Régua graduada vertical

4.5.4.1.5 Sistema de tracção do eixo Y

O sistema de tracção do eixo Y tem de assegurar o movimento do nível Y da unidade de contacto ao longo de uma gama de intervalo de 60 mm. Opta-se por um veio M3, pois o nível Y está limitado à altura de 5 mm. O apoio do veio é feito por furos na região A do nível Z da unidade de contacto entre a região B do mesmo nível, um com 3 mm de diâmetro e outro com 3,5 mm de diâmetro para evitar o bloqueio do veio roscado. Os dois furos referidos anteriormente são centrados na unidade de contacto em relação ao eixo X e ao eixo Z. A fixação do veio é feita por uma anilha de nylon (com 0,9 mm de espessura) (Figura 4.12.3) e uma porca de calote esférica (com 7 mm de espessura) (Figura 4.12.4) na extremidade associada ao furo de 3 mm. Na outra extremidade, a fixação é feita por outra anilha de nylon (com 0,9 mm de espessura) (Figura 4.12.4) e um conjunto porca/contra-porca M3 (Figura 4.12.2). Depois deste conjunto ainda existe uma porca recartilhada



Figura 4.12 - Fuso do nível Y com respectiva fixação e manipulo

(Figura 4.12.5), fixa ao veio com cola, que permite aplicar movimento rotacional ao veio. A largura do veio, para englobar todos estes elementos, tem de ser de 130 mm. O veio deve ser composto por uma liga metálica, para assegurar a sua estabilidade estrutural, visto que a sua largura é cerca de 40 vezes maior que o seu raio. Logo, opta-se por se usar um veio de aço zincado. O furo roscado M3 disposto ao longo do nível Y apresenta 10 mm na sua região central. Nas suas extremidades, está rebaixado apresentando 3 mm de diâmetro.

4.5.4.1.6 Sistema de guiamento do eixo Y

A região B do nível Z e o nível Y, ambos da unidade de contacto, correspondem à componente estática e à componente dinâmica do sistema de guiamento do eixo Y, respectivamente. Assim sendo, os carris da componente estática têm de estar dispostos na região B do nível Z da unidade de contacto. A forma dos carris mais simples é a rectangular. Esta deve estar posicionada de forma a restringir o movimento do nível Y da unidade de contacto nas direcções dos eixos X e Z. Os carris são constituídos por duas cantoneiras com 10 mm de altura, 5 mm de comprimento e 1 mm de espessura (Fig. 4.13). Estas são fixas com parafusos à face lateral anterior e à face lateral posterior da região B do nível Z da unidade de contacto e por isso apresentam passantes nas cantoneiras com 3 mm de diâmetro. O parafuso é M3 com cabeça de embeber e comprimento de 8 mm. Tanto os furos das cantoneiras, como os furos na unidade de contacto são escareados. As regiões da face superior do nível Y da unidade de contacto que se encontram sob as cantoneiras têm de ser rebaixasadas no valor de 1 mm, assumindo uma altura de 4 mm. O comprimento da região rebaixada é de 5,6 mm (resultante de rectificação de folga) para assegurar que a cantoneira só contacte a região rebaixada.

O comprimento e a largura do nível Y da unidade de contacto assumem uma importância significativa no desempenho do sistema de guiamento do eixo Y. Logo, há a necessidade de definir um valor para a tolerância dimensional do sistema de guiamento do eixo Y. Esta assume o valor da folga é de 0,05 mm. O valor do comprimento do nível Y da unidade de contacto é de 74,2 mm e o valor do comprimento da região B do nível Z da unidade de contacto é de 74,25 mm. O Apêndice III demonstra como os valores apresentados para a folga e para o comprimento e largura do nível Y da unidade de contacto, permitem uma variação máxima da posição do sistema de contacto com os pontos marcados – originada por uma possível rotação em torno de um eixo vertical – de $\pm 0,32$ mm, inferior ao valor da precisão requerida para o instrumento.

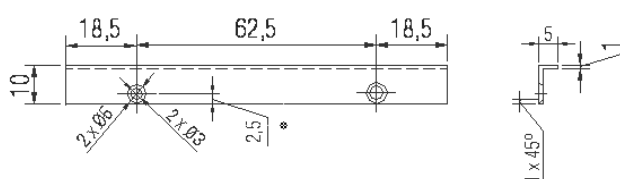


Figura 4.13 - Cantoneira

4.5.4.1.7 Sistema de travagem do eixo Y

A função do sistema de travagem do eixo Y é executada pelo mecanismo do sistema de tracção em conjunto com o nível Z da unidade de contacto.

4.5.4.1.8 Sistema de medição do eixo Y

O sistema de medição do eixo Y é constituído por uma régua graduada de 100 mm com uma resolução de medição de $\pm 1,0$ mm. A régua deve apoiar-se na face lateral posterior da unidade de contacto. Nesta face encontra-se a cantoneira posterior do sistema de guiamento do eixo Y. Opta-se por gravar a escala directamente sobre a face posterior do sistema de guiamento do eixo Y, com uma máquina computadorizada com comando numérico de gravação mecânica, modelo IS400 da empresa GravoGraph, Inc. com uma precisão até 0,0127 mm em relação a cada dimensão do espaço. Para assegurar a fiabilidade do processo de gravação, a escala é desenhada recorrendo ao software associado à máquina de gravação (GravoStyle). A escala é constituída por marcas em intervalos de 1 mm, sendo maiores em cada intervalo de 5 mm. Em intervalos de 10 mm também são gravados números de 0 a 9, representando a distância em centímetros da marca de referência (marca de 0 cm). Por fim, antes de ser iniciado o processo de gravação, este é previamente testado numa cantoneira de testes, assegurando que o processo de gravação é satisfatório. Opta-se por se utilizar cantoneiras de alumínio, pois este material é mais suave que o aço inoxidável permitindo uma gravação mais precisa. Para facilitar a leitura da escala, as marcações foram preenchidas com tinta acrílica sintética preta.

Cada unidade de contacto tem um elemento do sistema de medição do eixo, nomeadamente, uma escala gravada na sua cantoneira posterior do sistema de guiamento do eixo Y. Entre as unidades de contacto, os seus elementos são independentes, tendo cada escala a sua origem do referencial em relação ao eixo Y no valor 0 mm da referida escala. Os desvios posicionais dos referenciais das escalas entre as unidades de contacto são aferidos e considerados após o registo das leituras em todas as unidades de contacto. A marcação da posição do nível Y da unidade de contacto é feita pela face lateral esquerda da cremalheira que constitui o sistema de tracção do eixo X e a leitura é feita pela comparação entre a posição desta última e as marcações da escala gravada na cantoneira posterior do sistema de guiamento do eixo Y, relativamente ao eixo Y. O registo da leitura é feito manualmente pelo utilizador num suporte adequado (folha de cálculo, papel, etc.).



Figura 4.14 – Régua gravada na cantoneira

4.5.4.1.9 Sistema de tracção do eixo X

O sistema de tracção do eixo X tem de assegurar o movimento da sonda de contacto, ao longo do eixo X, numa gama de intervalo de 150 mm. A sonda de contacto encontra-se na extremidade anterior da cremalheira no nível X. Este nível está limitado dimensionalmente a 5 mm de altura. A cremalheira do sistema de tracção do eixo X está disposta longitudinalmente paralela ao eixo X, a sua face dentada corresponde a uma das faces laterais e é controlada por dois pinhões dispostos horizontalmente. O comprimento da cremalheira tem de ser maior que a soma do comprimento do nível Y com a gama de intervalo de movimento no eixo X, ou seja, 75 mm + 150 mm = 225 mm. A empresa Güdel GmbH apresenta uma cremalheira (Ref. 128 005) (Figura 4.15.2) com 159 dentes de módulo 0,5, 250 mm de comprimento, 4 mm de altura e 4,5 mm de largura (4 mm quando engrenada com o pinhão). É composta por Hostaform C (copolímero de polioximetileno). Os respectivos pinhões (Ref. SH 0560) (Figura 4.15.1) de módulo 0,5 com 3 mm de altura, 31 mm de diâmetro (15 mm de raio primitivo). Este diâmetro permite que uma porca do pinhão posterior seja exterior à unidade de contacto. Por uma questão de equilíbrio do desenho do nível Y, o pinhão anterior encontra-se na posição simétrica do pinhão posterior, em relação ao plano de simetria do nível Y da unidade de contacto, paralelo ao eixo Y. As estruturas dos centros de rotação dos pinhões têm de ser cilíndricas e estar apoiadas sobre o nível Y da unidade de contacto. Para além disso, estas estruturas têm de ser interiores relativamente às regiões rebaixadas do nível Y da unidade de contacto unidade de contacto. Para a sua fixação, opta-se por uma configuração com um tubo oco, fixo ao nível Y por um parafuso disposto ao longo do eixo vertical do tubo. O parafuso é com cabeça de embeber M3 e 8 mm de altura. A face superior do tubo também é escareada, para que a cabeça do dito parafuso fique à face com o tubo. O furo central do tubo está alinhado com um furo roscado M3 vertical disposto no nível Y, ao qual o parafuso M3 é fixo. O furo roscado é rebaixado 1 mm em altura para receber o tubo do centro de rotação dos pinhões do nível X, assegurando assim a manutenção da sua posição. O diâmetro exterior do tubo tem de ser o mesmo que o diâmetro do furo central dos pinhões, ou seja, 6 mm. A cremalheira e os pinhões deste sistema serão referidos, a partir deste ponto, como cremalheira horizontal e pinhões horizontais respectivamente, por uma questão de simplificação de linguagem.

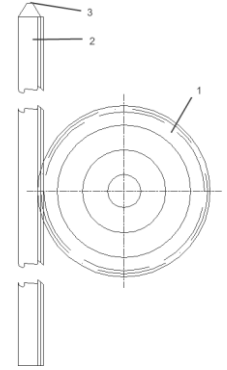


Figura 4.15 - Engrenagem horizontal

4.5.4.1.10 Sistema de guiamento do eixo X

O sistema de guiamento do eixo X tem um certo grau de dependência do sistema de tracção do eixo X visto os pinhões e a cremalheira deste último sistema também cumprirem funções de guiamento. A componente dinâmica do sistema de guiamento do eixo X é constituída pela

cremalheira horizontal. A componente estática do sistema de guiamento do eixo X é composta pelos dois pinhões horizontais, por uma estrutura rectilínea paralela à cremalheira horizontal e por uma estrutura superior às duas estruturas anteriores.

A estrutura rectilínea paralela à cremalheira horizontal, em conjunto com os pinhões horizontais, têm como função impedir que a dita cremalheira se desloque na direcção do eixo Y. A sua altura é de 4 mm, a sua largura 4,5 mm e 60 mm de comprimento. Por fim esta encontra-se apoiada na face superior do nível Y da unidade de contacto.

A estrutura superior do sistema de guiamento do eixo X está limitada a 1 mm de altura. Opta-se por se usar uma chapa metálica em aço inoxidável com 0,8 mm de altura, 39 mm de largura e 60 mm de comprimento. Esta apoia-se na estrutura rectilínea do sistema de guiamento do eixo X e nos tubos centrais dos pinhões horizontais do nível X. Tem dois furos verticais de 3 mm escareados alinhados os tubos centrais dos pinhões horizontais.

4.5.4.1.11 Sistema de travagem do eixo X

A função do sistema de travagem do eixo X é executada pelo sistema de tracção do eixo X e pelo sistema de guiamento do mesmo eixo, tal como foi referido em 4.5.2.3.3.4.

4.5.4.1.12 Sistema de medição do eixo X

A complexidade e diversidade de sistemas incluídos na unidade de contacto impõem que o sistema de medição do eixo X seja feito por um elemento exterior à própria unidade de contacto. Este é constituído por uma régua graduada e calibrada com um comprimento mínimo de 200 mm. A medição neste eixo é igual à subtracção do valor do comprimento da cremalheira horizontal do nível X pelo valor do comprimento da unidade de contacto (74,2 mm + 1mm + 1mm) e pela distância desde a extremidade posterior da cremalheira horizontal da unidade de contacto até à face posterior da cantoneira posterior do nível Y. A régua é utilizada para determinar este último valor, devendo ser este o valor registado e só posteriormente é que se deve fazer a devida subtracção. A medição é feita com a régua apoiada na face posterior da cantoneira posterior do nível Y e com a sua escala paralela à cremalheira horizontal do nível X. O referencial da régua tem de estar à face para assegurar uma correcta medição da distância pretendida. Consequentemente, opta-se por uma régua graduada e calibrada Medid, S.A. com 300 mm de comprimento, origem do referencial à face e com uma resolução de 1 mm e desvio de 0,05 mm ao longo do seu comprimento. O registo da leitura é feito manualmente pelo utilizador num suporte adequado (folha de cálculo, papel)

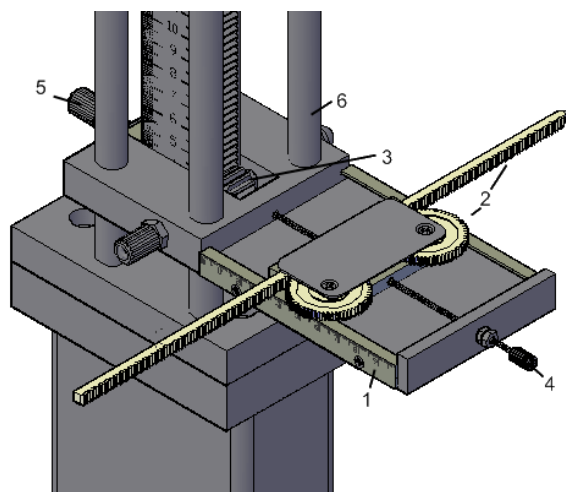


Figura 4.16 – Unidade de contacto
 (1) Sistema de guiamento do eixo Y
 (2) Sistema de tracção do eixo X
 (3) Sistema de guiamento do eixo Z
 (4) Sistema de tracção do eixo Y
 (5) Sistema de travagem do eixo Z
 (6) Sistema de guiamento do eixo

4.5.4.2.13 Material dos níveis da unidade de contacto

Após o desenvolvimento de todos os conceitos associados à unidade de contacto, é necessário definir o material que compõe os seus 3 níveis. Considerando que são 25 unidades de contacto, questões como a densidade, o custo, o processamento (processo de fabrico) são consideradas importantes. As famílias de materiais com características mais adequadas para as unidades de contacto são os metais e os polímeros, cada uma com vantagens e desvantagens. Numa análise simplista, se for definida uma gama de intervalo de valores para a resistência mecânica, rigidez e densidade, os polímeros encontram-se mais próximo dos limites inferiores e os metais mais próximos dos limites superiores relativamente ao material que se considera mais adequado para as unidades de contacto. Consequentemente, os materiais que mais se aproximam dos requisitos para a unidade de contacto são os metais mais leves (ligas de alumínio e cobre [duralumínio]) e os polímeros com maior rigidez (termoplásticos: poliamida [Nylon], polimetilmetacrílate [acrílico/PMMA], polioximetileno [acetil/POM]). As suas propriedades são apresentadas na tabela 4.1:

| Nome | Tensão de cedência [MPa] | Extens. Rotura [%] | Rigidez [GPa] | Densidade [Kg/dm ³] | Expansão térmica α [10 ⁻⁶ /C] | Preço [€/dm ³] |
|-------------|--------------------------|--------------------|---------------|---------------------------------|---|----------------------------|
| Duralumínio | 324 | 19 | 73 | 2,77 | 22 | 18,3 |
| PMMA | 72 | 5 | 2,93 | 1,19 | 68 | 3,3 |
| POM | 68,9 | 35 | 3,6 | 1,425 | 85 | 7,2 |
| Nylon | 62 | 27 | 2,75 | 1,10 | 81 | 5,9 |

Tabela 4.1 - Propriedades dos materiais em estudo para a estrutura da unidade de contacto [56, 57, 61]

A densidade do duralumínio, comparativamente com os polímeros, é cerca do dobro e a tensão de cedência cerca do quádruplo. Os polímeros apresentam propriedades semelhantes entre si, com excepção da extensão de rotura do PMMA que é cinco a sete vezes menor. Apesar de o duralumínio apresentar melhores propriedades mecânicas, a sua densidade iria aumentar

significativamente o peso das 25 unidades de contacto, comparativamente com as outras opções. O seu custo relativo também é cerca de três a cinco vezes maior que o preço dos polímeros, factor que diminui o interesse neste material. Note-se que os valores dos preços apresentados para os materiais são de revendedores e com os materiais em forma de chapa (ou folha). Logo, a sua importância para a selecção do material associado à unidade de contacto reside na percepção (qualitativa ou hierarquizada) do valor económico dos diferentes materiais. Entre os polímeros, o PMMA apresenta propriedades mecânicas a nível da estabilidade dimensional ligeiramente melhores. O seu custo relativo também ligeiramente inferior. Para além destes aspectos, o PMMA tem uma transmissão luminosa de 92%, apresentando-se translúcido, o que resulta numa estética mais apelativa. O seu processamento a partir de folhas extrudidas (Plexiglas®) é muito versátil, podendo-se aplicar as ferramentas tipicamente utilizadas em oficinas de mecânica. Por todas as razões já enumeradas, opta-se por usar o PMMA (acrílico) como material para a unidade de contacto.

4.5.4.2 Sistema de contacto – sonda

A sonda de contacto tem de ser incluída na extremidade anterior da cremalheira horizontal. Esta pode ser definida pela maquinação da região anterior da cremalheira horizontal de modo a que a sua extremidade apresente a forma de um tronco cónico disposto horizontalmente.

4.5.4.3 Sistema de suporte

O sistema de suporte providencia o apoio estrutural às unidades de contacto, de modo a que estas possam ser posicionadas ao longo do eixo vertical (eixo Z). Este sistema é dividido em duas regiões. A região I sustenta estruturalmente a região S do mesmo sistema. A região S fornece suporte aos elementos do eixo Z da unidade de contacto, comuns a todas estas.

A região S do sistema de suporte apoia estruturalmente os seguintes elementos: cremalheira do sistema de tracção do eixo Z (Figura 4.17.9); veios do sistema de guiamento do eixo Z (Figura 4.17.1); superfície contacto dos calços do sistema de travagem do eixo Z; régua graduada do sistema de medição do eixo Z (Figura 4.17.2). No conceito associado a esta região foi definido que esta teria duas estruturas horizontais e uma estrutura vertical, mais concretamente, um perfil de base quadrangular com altura igual à dos elementos que suporta (1000 mm) (Figura 4.17.10). Tanto os veios do sistema de guiamento do eixo Z como o perfil quadrangular são fixos às duas estruturas horizontais. A cremalheira do sistema de tracção do eixo Z e a régua graduada do sistema de medição do eixo Z estão fixas às faces laterais do perfil quadrangular. A superfície de contacto dos calços do sistema de travagem do eixo Z é formada também por uma face lateral do perfil quadrangular.

O perfil de base quadrangular apresenta 1000 mm de altura, 16 mm de lado, 1 mm de espessura e, conseqüentemente, um furo interior quadrangular com 14 mm de lado. A cremalheira do sistema de tracção do eixo Z é fixa ao perfil quadrangular por cinco parafusos e cinco porcas de rebitar M4 cravadas na face lateral do perfil que recebe a cremalheira. Opta-se por posicionar os furos a 160 mm, 350 mm, 550 mm, 750 mm, 950 mm. A cremalheira e o perfil quadrangular, não estão alinhados pelos seus centros, mas sim pelas suas faces laterais posteriores, pois estas recebem a régua graduada do sistema de medição do eixo Z e é essencial que não

haja uma descontinuidade entre a superfície dos dois elementos. Esta régua graduada é colada ao perfil quadrangular, ficando recuada 1 mm do topo dos dentes da cremalheira. Na face lateral anterior do conjunto cremalheira e perfil quadrangular, é colada uma barra, simétrica à régua graduada, com 2 mm de comprimento, 30 mm de largura e 1000 mm de altura, em aço inoxidável, para equilibrar dimensionalmente o referido conjunto. A posição relativa dos veios do sistema de guiamento do eixo Z e do perfil quadrangular estão em concordância com os furos da região A do nível Z da unidade de contacto. Os veios do sistema de guiamento do eixo Z são inseridos em regiões rebaixasadas (4 mm) das estruturas horizontais e são fixos com parafusos M6 (Figura 4.17.7). A fixação do perfil quadrangular é feita por espigões (Figura 4.17.5). Logo, são estes últimos que são fixos às estruturas horizontais, também por parafusos, tal como nos veios. Os espigões são barras com base quadrangular, 13,8 mm de lado e 40 mm de altura. Os furos nas estruturas associados à fixação dos espigões têm forma de bastonete (Figura 4.17.8). Assim, pode-se ajustar a posição do perfil quadrangular para que a engrenagem do sistema de tracção do eixo Z funcione satisfatoriamente. Todos os parafusos M6 estão inseridos em furos rebaixasados (7 mm).

A estrutura horizontal superior tem 80 mm x 75 mm x 15 mm (Figura 4.17.4) e a estrutura horizontal inferior tem 110 mm x 75 mm x 15 mm (Figura 4.17.3) (comprimento x largura x altura). Estas são compostas por uma liga metálica de alumínio/cobre Duralumínio de fácil maquinação.

A região S do sistema de suporte apoia-se na região I do mesmo sistema (Figura 4.18.1). Esta última é composta por duas estruturas: i) uma estrutura vertical que faz a ligação à plataforma do

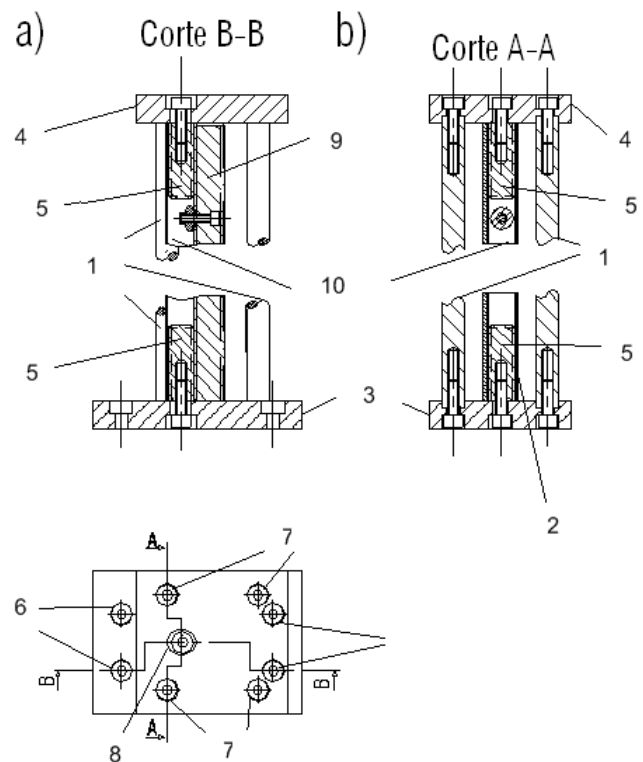


Figura 4.17 – vistas com cortes da região superior do sistema de suporte

sistema de posicionamento; ii) uma estrutura horizontal que faz a ligação entre o perfil e a região S do sistema de suporte.

A estrutura vertical tem de suportar toda a região S, as unidades de contacto e tem ainda de posicionar a origem da régua graduada do nível Z a 800 mm da plataforma (Figura 4.18.2). Logo, opta-se por se usar um perfil de base rectangular com vértices arredondados, em aço ST37, com 50 mm de comprimento, 100 mm de largura e 765 mm de altura. A sua orientação tem de ser com o eixo maior da sua base na direcção do eixo Y, visto ser a direcção em que a estrutura da unidade de contacto é mais alongada. A estrutura horizontal da região tem 110 mm de comprimento, 75 mm de largura e 20 mm de altura em aço ST 37 (Figura 4.18.3). Tem ainda 4 furos passantes roscados M6 para fixar a região superior do sistema de suporte através de parafusos M6 (Figura 4.18.4). As duas estruturas desta região são fixas por soldadura.

4.5.4.4 Sistema de posicionamento

O sistema de posicionamento é composto por uma plataforma e os respectivos apoios ajustáveis (Figura 4.18.6) (Figura 4.18.7). Este sistema, para além de definir a posição da pessoa a ser medida, também sustenta todos os outros sistemas do instrumento, assegura a estabilidade do instrumento e ainda permite a adaptação deste último a possíveis irregularidades no solo, mantendo a plataforma numa posição horizontal, o sistema de suporte numa posição vertical e as unidades de contacto numa posição horizontal.

A plataforma, para além de posicionar a pessoa avaliada, também tem a função de contrapeso, ao anular momentos de força aplicados no sistema de suporte que possam ser gerados por forças exteriores aplicadas (acidentalmente) (Figura 4.18.5). A plataforma é composta por uma chapa de aço ST 37 com 5 mm de espessura e 550 mm de lado. As suas faces laterais e os seus cantos são arredondados, por questões de segurança. A sua face inferior também é reforçada estruturalmente por 2 cantoneiras de abas iguais, dispostas diagonalmente cruzando-se no centro. Estas são fixas com pontos de soldadura e encontram-se dispostas com a aresta de interface das duas abas deste elemento em direcção ao solo. Tal como no perfil rectangular, a plataforma também é pintada. O centro do perfil rectangular encontra-se a 37,5 mm da aresta posterior da face superior da plataforma e a 183 mm da aresta direita da mesma face.

Por fim, a face superior da plataforma é revestida por um tapete de borracha sintética pitonada. Este é cortado a partir de um rolo e é efectuado o furo para a passagem do perfil rectangular da região I do sistema de suporte. A fixação é feita com cola de contacto.

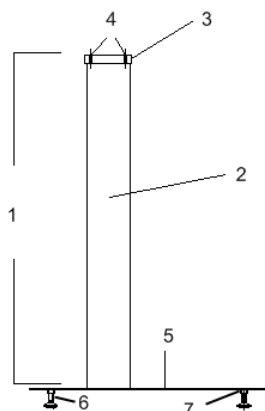


Figura 4.18 – Sistema de posicionamento e região inferior do sistema de suporte



Figura 4.19 – Imagem real do instrumento

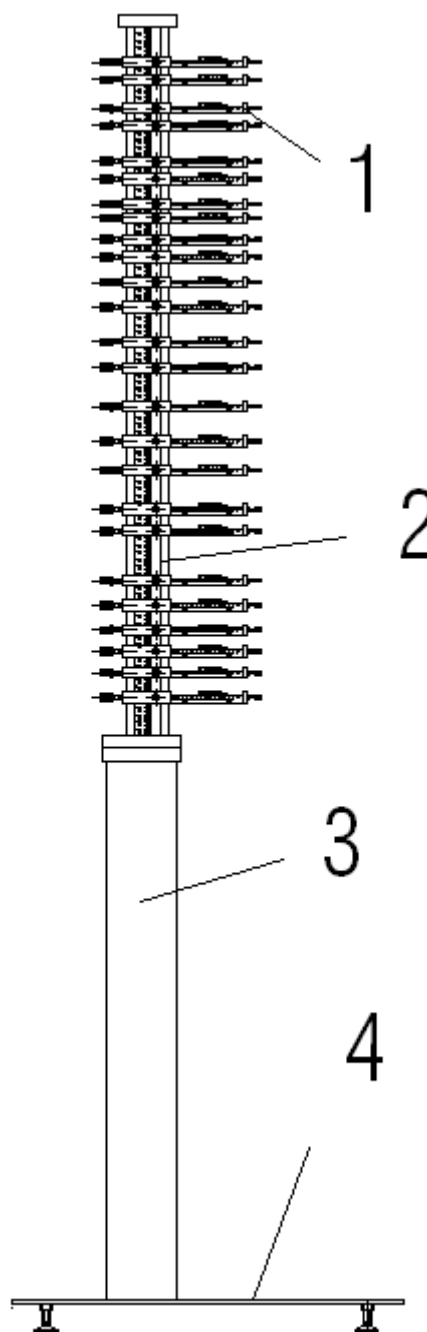


Figura 4.20 – O instrumento.

- (1) Unidade de contacto
- (2) Região superior do sistema de suporte
- (3) Região inferior do sistema de suporte
- (4) Sistema de posicionamento

5. Validação do instrumento

A avaliação do produto consiste na análise do desempenho do instrumento em relação aos requisitos definidos no início do projecto de concepção [37], Ou seja, a avaliação da capacidade de medição do instrumento. Esta última foi definida quantitativamente como a medição dos pontos com a fidelidade de ± 1 mm para cada coordenada. Consequentemente, numa definição simplista, a avaliação consiste da determinação da fidelidade do instrumento de medição. Este processo é denominado de validação do instrumento. Essencialmente, para a sua execução é necessário o instrumento de medição em si e um conjunto de pontos tridimensionais com posições pré-definidas, com as respectivas coordenadas bem conhecidas. O primeiro é aplicado múltiplas vezes nos pontos pré-definidos, obtendo-se um conjunto de medições das coordenadas desses pontos. Por fim, os valores medidos são trabalhados estatisticamente e comparados com os valores pré-definidos. Os dados resultantes permitem analisar o desempenho do instrumento e, consequentemente fazer a avaliação do produto desenvolvido. Dividindo o processo de validação por fases, pode-se criar a seguinte sequência: (1) Construção do modelo físico; (2) definição das coordenadas dos pontos pré-definidos; (3) construção de uma representação física dos pontos pré-definidos; (4) definição do processo de aquisição dos dados; (5) Tratamento e análise dos dados.

5.1 Construção do modelo físico – o protótipo

A avaliação do instrumento concebido tem de ser executada através da análise do desempenho de uma representação física dos conceitos estabelecidos e desenvolvidos ao longo do processo de concepção descrito neste capítulo [37]. Ou seja, é necessário construir um modelo físico do instrumento concebido – um protótipo.

No Apêndice I é apresentada uma lista exaustiva de todos os elementos e componentes definidos no processo de concepção, para que se proceda ao fabrico e montagem do instrumento. A dita lista é ordenada decrescentemente segundo a sua função estrutural, ou seja, inicia-se com o sistema de posicionamento e culmina com o sistema de contacto.

5.2 Pontos de referência

A construção do protótipo permite a progressão do processo de avaliação. É agora necessário considerar os pontos pré-definidos. A partir deste ponto estes pontos pré-definidos serão denominados de pontos de referência.

O instrumento pretende determinar as coordenadas tridimensionais de vários pontos marcados ao longo da coluna vertebral dos examinados. Estes pontos têm algumas características, relativas uns aos outros, inerentes ao facto de cada um representar o ponto mais posterior da

apófise espinhosa de cada uma das 25 vértebras sequenciais (de S1 a C1), pertencentes à coluna vertebral da pessoa avaliada. Para a validação, é então necessário que os pontos de referência apresentem as mesmas características que esses pontos reais.

Os pontos de referência devem ser definidos a partir dos pontos reais referidos no parágrafo anterior. Estes últimos podem ser obtidos a partir de instrumentos de imagiologia médica como radiografias ou tomografias computadorizadas (TCs). Nesta última opção os dados finais resultam numa reconstrução tridimensional computadorizada. Consequentemente, a determinação das coordenadas da posição de pontos bem definidos é mais fácil e rigorosa. De facto, até é possível a eliminação de outras estruturas anatómicas que possam ocultar a posição da apófise espinhosa de cada vértebra, especialmente por parte das costelas e ossos constituintes da articulação do ombro (acrómio, omoplata, úmero). Logo, opta-se por utilizar exames de TC como fonte dos valores para os pontos de referência. Idealmente, dever-se-ia compilar um conjunto de exames, mas nesta fase do projecto de concepção na qual o protótipo vai ser avaliado pela primeira vez, considera-se suficiente usar um único exame de TC como referência. Até porque esse processo de compilação pode assumir contornos delicados, quer a nível da recolha de exames com as condições necessárias, quer a nível das autorizações de utilização dos dados, por parte dos examinados.

Assim sendo, usa-se um único exame de TC, com a devida autorização por parte do examinado. Na clínica onde o exame médico foi obtido, o profissional de imagiologia eliminou as costelas seccionando as ligações destas com as vértebras, nas apófises transversas, permitindo uma perfeita visualização das apófises espinhosas. Utilizando o software Osirix foi possível adquirir os pontos posteriores mais centrais das apófises espinhosas de todas as vértebras.

A tabela 5.1 apresenta as coordenadas do conjunto de pontos de referência

| X _p | Y _p | Z _p | X _p | Y _p | Z _p | X _p | Y _p | Z _p |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 116 | -25 | 666 | 40 | 0 | 488 | 39 | 6 | 299 |
| 104 | -20 | 644 | 37 | 3 | 459 | 39 | 8 | 272 |
| 99 | -16 | 627 | 35 | 3 | 426 | 40 | 8 | 238 |
| 98 | -13 | 612 | 32 | 4 | 403 | 38 | 13 | 207 |
| 90 | -9 | 596 | 30 | 6 | 383 | 40 | 14 | 175 |
| 72 | -6 | 579 | 30 | 2 | 363 | 38 | 16 | 148 |
| 63 | -4 | 560 | 30 | 4 | 344 | 32 | 20 | 126 |
| 54 | -1 | 543 | 34 | 4 | 321 | 33 | 19 | 111 |
| 47 | 0 | 514 | - | - | - | - | - | - |

Tabela 5.1 – Listagem das coordenadas seleccionadas para os pontos de referência

5.3 Estrutura de calibração

Após se definir o valor das coordenadas dos pontos de referência é necessário ter uma representação física desses pontos. Para tal, deve-se considerar a construção de uma estrutura com componentes ou elementos bem específicos: estes últimos têm de apresentar vértices que correspondam às coordenadas dos pontos de referência definidos na secção 5.2.

Assim sendo, é necessário desenvolver um projecto de concepção desta estrutura. A partir deste ponto, esta última é denominada de estrutura de calibração.

O desenvolvimento detalhado desta estrutura é apresentado no Apêndice II. Resumindo as suas características, a estrutura de calibração apresenta uma configuração bidimensional dupla, ou seja, a representação tridimensional dos pontos é feita em dois planos perpendiculares: XOZ (Figura 5.1.a) e YOZ (Figura 5.1.b). Em cada plano são representadas duas coordenadas do ponto, sendo a terceira constante. No plano XOZ são marcadas as coordenadas X e Z, sendo a coordenada Y constante. No plano YOZ são marcadas as coordenadas Y e Z, sendo a coordenada X constante. Em cada plano existe uma escala milimétrica contínua (de papel milimétrico), utilizada como referencial para o posicionamento dos pontos de acordo com as suas coordenadas. A qualidade da escala do papel milimétrico é avaliada por uma bateria de medições e foi definida uma recta de correcção por regressão linear dos dados obtidos (Apêndice II).

O ponto marcado na estrutura de calibração tem de ser paralelo à superfície de contacto da sonda do protótipo do instrumento. Logo, no plano XOZ, é necessário acrescentar um elemento que assegure essa exigência. Para tal, utilizam-se alfinetes “push-in” modificados de forma a apresentarem uma extremidade pontiaguda que representasse o ponto marcado. É registado um conjunto de medições de pontos na superfície dos alfinetes após fixos na estrutura de calibração, para a determinação correcta da posição que estes representam. Para cada alfinete é definido a diferença entre a sua posição e a posição que é pretendido representarem. Esta diferença, tal como as rectas de correcção da escala das folhas de papel milimétrico, são consideradas na definição da posição dos pontos de referência marcados na estrutura de calibração, quando estes são comparados com os valores medidos pelo protótipo do instrumento. Estes podem ser resumidos na tabela 5.2.

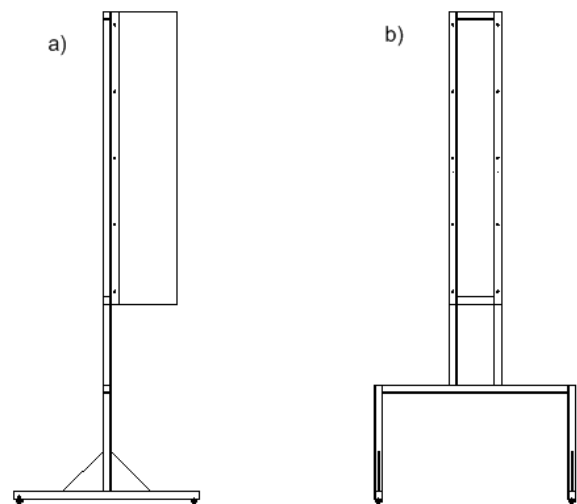


Figura 5.1 - Plano XOZ (a) e YOZ (b) da estrutura de calibração

| Vértebras | ΔZ_{PMXOZ} | ΔZ_{PMXOZ} | ΔX_{XOZ} | ΔY_{XOZ} | ΔZ_{XOZ} |
|-----------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|
| C1 | 2,34 | 2,17 | -0,27 | 0,20 | 0,00 |
| C2 | 2,26 | 2,10 | -0,13 | 0,09 | 0,44 |
| C3 | 2,20 | 2,05 | 0,07 | 0,01 | 0,00 |
| C4 | 2,14 | 2,00 | -0,08 | 0,06 | 0,00 |
| C5 | 2,08 | 1,94 | -0,02 | 0,01 | 0,44 |
| C6 | 2,02 | 1,89 | -0,32 | 0,22 | 0,00 |
| C7 | 1,95 | 1,85 | 0,13 | 0,03 | 0,50 |
| T1 | 1,88 | 1,77 | -0,14 | 0,10 | 0,00 |
| T2 | 1,77 | 1,68 | 0,07 | 0,01 | 0,00 |
| T3 | 1,68 | 1,59 | -0,03 | 0,02 | 0,00 |
| T4 | 1,57 | 1,50 | 0,05 | 0,01 | 0,00 |
| T5 | 1,44 | 1,39 | -0,65 | 0,46 | 0,00 |
| T6 | 1,36 | 1,31 | 0,02 | 0,01 | 0,00 |
| T7 | 1,28 | 1,25 | -0,37 | 0,26 | 0,00 |
| T8 | 1,21 | 1,18 | -0,37 | 0,26 | 0,00 |
| T9 | 1,14 | 1,12 | 0,08 | 0,02 | 0,00 |
| T10 | 1,05 | 1,05 | 0,21 | 0,04 | 0,00 |
| T11 | 0,97 | 0,97 | -0,06 | 0,05 | 0,00 |
| T12 | 0,87 | 0,89 | 0,06 | 0,01 | 0,00 |
| L1 | 0,74 | 0,78 | 0,08 | 0,01 | 0,00 |
| L2 | 0,62 | 0,67 | -0,05 | 0,03 | 0,00 |
| L3 | 0,51 | 0,57 | -0,16 | 0,12 | 0,44 |
| L4 | 0,40 | 0,48 | -0,50 | 0,35 | 0,00 |
| L5 | 0,32 | 0,41 | 0,16 | 0,03 | 0,56 |
| S1 | 0,27 | 0,36 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tabela 5.2 – Correções para os valores dos pontos de referência.

ΔZ_{PMXOZ} – correcção da coordenada Z relativamente ao plano XOZ derivado da recta de correcção da escala de papel milimétrico; ΔZ_{PMXOZ} – correcção da coordenada Z relativamente ao plano XOZ derivado da recta de correcção da escala de papel milimétrico; ΔX_{XOZ} – correcção da coordenada X da posição do alfinete no plano XOZ; ΔY_{XOZ} – correcção da coordenada Y da posição do alfinete no plano XOZ; ΔZ_{XOZ} – correcção da coordenada Z da posição do alfinete no plano XOZ

5.4 Processo de medição

A calibração consiste na análise da capacidade de medição do protótipo. Para uma contextualização das medições obtidas, é necessário determinar o posicionamento do protótipo relativamente à estrutura de calibração, visto as primeiras terem esta última como referencial.

5.4.1 Posicionamento relativo (pares de pontos)

A determinação da posição relativa entre o protótipo e a estrutura de calibração exige a construção de um conjunto de pares de pontos correspondentes, pertencendo cada um a uma das estruturas. O comprimento do segmento de recta definido por cada par de pontos deve ser registado e estas medições, em conjunto com a posição de cada par de pontos, permitem determinar a posição relativa pretendida. Este processo também auxilia o ajuste da estrutura de calibração em termos da posição dos apoios, de forma a alinhá-la com o instrumento.

Devido às características do protótipo, opta-se por definir os seus pontos nas placas (superior e inferior) da região superior do sistema de suporte. Para simplificar a referência a estas estruturas no processo de posicionamento relativo entre o protótipo e a estrutura de calibração, estas são apenas mencionadas como “placa inferior” e “placa superior” ou apenas “placas” se for referente a ambas, estando subentendido que ambas pertencem à região superior do sistema de suporte. São medidos quatro pontos, dois na placa inferior e outros dois na placa superior. Na primeira, são usados os dois vértices superiores da face anterior e na segunda os dois vértices inferiores também da face anterior. A posição dos vértices é conhecida, porque estes são limitados pelas placas e pela régua vertical do protótipo, a qual tem 1000 mm de comprimento.

Os pontos, na estrutura de calibração, são marcados através de uma régua metálica de 300 mm (régua de posicionamento) que é alinhada com cada um dos vértices acima referidos, apoiada na face lateral da placa inferior que contenha o mesmo e numa superfície lisa sobreposta sobre esta última. Este processo é exposto pormenorizadamente no Apêndice II

5.4.2 Marcação dos pontos

Como foi referido anteriormente, a marcação dos pontos é feita segundo as coordenadas obtidas a partir do exame TC. No plano YOZ, como o contacto é feito directamente entre o papel e a régua do protótipo, os pontos são marcados com uma esferográfica no vértice (de uma quadrícula) com os valores das coordenadas Y e Z desse mesmo ponto. No plano XOZ, devido ao paralelismo entre o papel milimétrico e a régua do protótipo, o contacto tem de ser feito com a adição de alfinetes. Começa-se por fazer a marcação no papel milimétrico, tal como no outro plano, mas agora com as coordenadas X e Z. Depois, com a extremidade pontiaguda do alfinete, perfura-se o papel milimétrico e a placa que o suporta até a base desse mesmo alfinete ficar em contacto com o papel. A linha de referência no alfinete, originária do seu molde de fabrico, tem de estar alinhada com a linha (horizontal) do papel quadriculado corresponde à coordenada Z, tanto no lado anterior como posterior da base do alfinete. A introdução do alfinete adiciona outra variável de incerteza. Para se perceber até que ponto esta variável é significativa, tem-se que medir, tanto na extremidade anterior

como na posterior, a altura do alfinete ao papel e a distância do ponto marcado à extremidade da base. Assim, obter-se-á a posição do alfinete após fixo na placa.

5.4.3 Processo de medição

Para o processo de medição é necessário especificar o número de medições e a sua ordem.

Para se ter uma noção da capacidade de medição do protótipo opta-se por efectuar 10 medições. Seguindo as recomendações estatísticas, para assegurar uma tendência normal, devem efectuar-se cerca de 30 medições. Mas neste caso, as 30 medições são exigentes em termos temporais. Então diminui-se para um número ainda razoável, para que exista um tratamento estatístico.

A utilização do protótipo segue um procedimento definido *a priori*. Antes de cada medição, todas as peças do protótipo são subidas e o processo é repetido como nas medições anteriores (apêndice II).

Opta-se por iniciar a medição pelo plano XOZ, sendo registado os valores das três coordenadas, independentemente de estas serem tendencialmente constantes ou variáveis. A estrutura de calibração é ajustada ao protótipo e as distâncias necessárias são medidas, em conformidade com o descrito acima relativamente a este procedimento. Registam-se 10 medições. Roda-se a estrutura de calibração em 180° e é repetido todo o processo desde o ajuste do plano XOY até ao registo das medições.

5.5 Análise estatística dos dados

5.5.1 Valores medidos com a estrutura de calibração

Após a definição de todos os aspectos relacionados com a estrutura de calibração e com o seu posicionamento relativamente ao protótipo, pode-se iniciar a medição dos valores.

Nas tabelas do Apêndice II são apresentados os dados obtidos, com a representação de todas as variáveis de cada conjunto de medições para cada um dos planos

5.5.2 Tratamento estatístico das medições efectuadas

As medições efectuadas com o protótipo na estrutura de calibração só por si não demonstram a sua capacidade de medição. Além disso, como qualquer medição, esta tem uma incerteza inerente à sua própria natureza. É necessário avaliar tanto o valor central de cada conjunto de medições como a sua dispersão, de forma a compreender-se o seu comportamento e assim poder-se determinar a sua capacidade. Neste processo de validação, pretende-se definir o grau de fidedignidade das

medições efectuadas pelo instrumento. Este parâmetro também conhecido como a fidelidade da medição do instrumento. Também se pretende avaliar a proximidade entre os valores medidos e o valor esperado das coordenadas de cada ponto de referência, ou seja, o erro da medição. O valor esperado, corresponde ao valor definido para os ponto de referência com as correcções da tabela 5.2. Os valores medidos correspondem às medições obtidas com o instrumento após a aplicação das respectivas correcções, apresentadas posteriormente. Recorrendo à Estatística pode-se conseguir atingir esses objectivos. Este processo é denominado de tratamento estatístico dos dados recolhidos [37-39, 62].

Os dados obtidos correspondem às amostras associadas à determinação da posição de cada coordenada de cada ponto de referência. Mais concretamente, cada conjunto de leituras de uma coordenada de um ponto de referência compõe uma amostra de medições associadas a essa mesma coordenada. Logo, o tratamento dos dados recolhidos centra-se na análise do comportamento de cada uma das amostras recolhidas, ou seja, na análise da distribuição de valores associados a cada amostra. Esta análise tem de apresentar o valor tendencial da distribuição e um parâmetro de dispersão que permita calcular a fidelidade do instrumento associado à determinação de cada coordenada de cada ponto.

A comparação entre a medição efectuada e a medição esperada pode ser feita pela diferença entre ambas [38, 39, 62], ou seja, pela determinação do erro da medição. A medição efectuada é apresentada como um conjunto de valores, logo é necessário definir como se efectua o cálculo da diferença. Este é feito pela subtracção entre o valor esperado e o valor medido associado a cada leitura efectuada, criando uma nova amostra de valores, referentes ao afastamento ou proximidade da medição esperada. Assim sendo, toda a análise estatística dos dados em questão centra-se nos valores das diferenças calculadas. A partir deste momento, os dados trabalhados estatisticamente são definidos como erros da medição. É determinado o valor central do erro da medição para cada coordenada e para cada unidade de contacto. Também é definido o seu grau de dispersão ou fidelidade da medição [62].

Na concepção deste instrumento, cada coordenada que se pretende é analisada de forma independente das outras coordenadas, quer sejam do mesmo ponto ou de pontos diferentes. Logo, no tratamento estatístico cada conjunto de leituras associado a cada uma das coordenadas também é analisado individualmente. Isto significa que os erros da medição associados a cada um desses conjuntos (que se irá denominar de conjunto dos erros da medição a partir deste momento) são analisados individualmente. Cada conjunto de erros da medição é definido como a amostra associada à determinação da posição respectiva coordenada de um ponto de referência.

A determinação do valor central de uma amostra é tipicamente definida como média. Para as amostras em questão aplica-se a média aritmética. Esta é definida como [62]: “Para um conjunto de N números, X_1, X_2, \dots, X_N , a média aritmética (\bar{X}) é calculada por $\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N}$ ”.

A determinação da fidelidade de cada conjunto de erros da média já é um pouco mais complexa. Esta está dependente da distribuição da amostra. Se a população da amostra apresentar uma distribuição normal (distribuição gaussiana), pode-se calcular o intervalo de valores no qual uma percentagem dessa população está inserida, denominado de intervalo de confiança [62]. Perante estas condições, a fidelidade do instrumento pode ser definida pelo intervalo de confiança que represente 95% ou 99% dos dados. De uma outra perspectiva, também se pode determinar qual a percentagem de medições que estaria distribuída até $\pm 1\text{mm}$ do valor central da amostra, visto ser este o valor da fidelidade definido dos requisitos do instrumento. Através do cálculo desvio padrão, acrescido da média, pode-se calcular o intervalo de confiança, com base nas probabilidades associadas à função normal. Se a amostra analisada tiver 30 ou mais valores (diferenças neste caso), segundo o teorema do limite central, a distribuição da população da amostra pode-se considerar que apresente um comportamento normal. No entanto, devido a restrições temporais e considerando que esta não é a validação final do instrumento (pois ainda pode ser modificado), procura-se um método alternativo.

A teoria das pequenas amostras da Estatística, através da distribuição *t-student*, apresenta um método similar ao apresentado anteriormente para a determinação do intervalo de confiança. Este pode ser aplicável a amostras de populações normais com menos de 30 valores. Para uma amostra de 10 valores e intervalos de confiança de 95% ou 99%, uma precisão de $\pm 1\text{mm}$ implica que a estimativa amostral do desvio padrão tenha de ser de 1,15 ou 0,97. Estima-se que a amostra resultante da aplicação do instrumento possa apresentar um desvio padrão menor que o valor definido, logo opta-se por usar uma dimensão amostral de 10. Para a utilização deste método, é necessário confirmar a normalidade da distribuição da população associada à amostra. Para tal, aplica-se um teste estatístico específico de aderência à normalidade: teste de Kolmogorov-Smirnov. A análise do parâmetro resultante deste teste permite afirmar se a distribuição da população da amostra testada é tendencialmente normal [62]. A determinação de todos os parâmetros e testes estatísticos é processada através do programa informático “Statistical Package for Social Sciences 13,0 for Windows” (SPSS para Windows).

5.5.2.1 Valores esperados

Os valores esperados são definidos pelos pontos marcados na estrutura de calibração, após acrescento das influências da escala das folhas de papel milimétrico na coordenada Z de ambos os planos e dos alfinetes no plano XOZ. A quantificação destas correcções já foi feita anteriormente sendo apenas apresentada a tabela com as correcções para cada coordenada de cada nível em cada um dos planos. Há ainda que ter em conta o facto de a aquisição ser feita em dois planos distintos e cada um ter uma coordenada constante, sendo o seu valor obtido a partir dos dados recolhidos no alinhamento entre as estruturas. Nomeadamente o valor do comprimento de cada alfinete (desde o centro da face circular plana da base até à face circular plana do topo) para a coordenada Y no plano XOZ e o valor da coordenada (X_{D1}) dos pares de pontos no plano YOZ. No entanto, como este último valor é obtido desde as placas do sistema de suporte até à estrutura de calibração e a distância que se pretende que o instrumento meça a distância desde a cantoneira horizontal posterior até à estrutura de calibração, então é necessário compensar a diferença entre a distância desde a cantoneira horizontal anterior até à placa do sistema de suporte. Partindo do pressuposto que as unidades de contacto estão perfeitamente alinhadas com as placas do sistema de suporte e sabendo que o comprimento de cada é 74,2 mm (acrílico) + 2 mm (2 cantoneiras horizontais) e 75 mm respectivamente, então a diferença será de 1,2 mm ($76,2\text{mm} - 75\text{mm} = 1,2\text{ mm}$) distribuída por ambas as regiões anterior e posterior das peças), ou seja, a diferença entre a cantoneira horizontal anterior e a placa do sistema de suporte é de 0,6 mm, o que obriga a uma correcção do valor esperado de 0,6 mm (-0,6mm).

Para a coordenada Y do plano XOZ, a sua origem encontra-se no plano definido pelas folhas de papel milimétrico. O valor esperado nesta coordenada é igual ao valor da distância desde na face circular plana da base do alfinete até ao ponto de contacto. Assumindo o valor médio de 12 mm para essa distância, dever-se-á considerar que o ponto de contacto de todos os alfinetes encontrar-se na posição 12 mm.

5.5.2.2 Valores medidos

O registo dos valores a partir do instrumento segue o procedimento de medição deste último. Associado a este, existe um desfasamento entre a posição onde os valores são medidos em cada uma das escalas e a posição da extremidade que entra em contacto com a estrutura de calibração. Para além desta influência, é necessário equacionar também a posição relativa entre o instrumento e a estrutura de calibração, valores esses que são obtidos a partir do registo das coordenadas dos pares de pontos e da régua de posicionamento, efectuados durante o alinhamento entre as duas estruturas, tendo em conta que cada plano deve ser analisado separadamente. É então necessário definir a correcção resultante, definida como desfasamento 1 e desfasamento 2 respectivamente. Os

valores medidos são definidos como as medições (dados obtidos) acrescidos da correcção associada a estes desfasamentos.

Começando pelo desfasamento 1, cada coordenada é analisada independentemente. A coordenada Z é lida na régua vertical do instrumento, usando como marcação a sua intercepção com um plano que contenha a face superior de cada unidade de contacto. O ponto de contacto do instrumento situa-se na extremidade arredondada (anterior) da cremalheira horizontal. O seu centro encontra-se numa posição 3 mm inferior à marcação anteriormente referida (-3 mm). A coordenada Y é lida na cantoneira horizontal graduada (posterior) de cada unidade de contacto, usando como marcação um plano que contenha a face lateral esquerda (sem dentes) da cremalheira horizontal. Tal como no caso anterior, o valor lido da coordenada Y está desfasado do ponto de contacto, mas desta vez o ponto encontra-se situado a 2 mm à direita do valor lido (+2 mm). A coordenada X é lida através de uma medição indirecta. Em vez de se medir a distância pretendida, desde a unidade de contacto (cantoneira horizontal anterior não graduada) até ao ponto de contacto na extremidade arredondada (anterior) da cremalheira horizontal, o procedimento consiste em medir a distância desde a extremidade posterior da cremalheira horizontal até à cantoneira horizontal posterior graduada da unidade de contacto (d_p), sabendo que essa distância em conjunto com a distância entre as duas cantoneiras (d_{L-L}) e com a distância pretendida (de leitura) (d_L) acima referida é igual ao comprimento total da cremalheira horizontal da estrutura de calibração (d_{CH}), ou seja,

$$d_{CH} = d_p + d_{L-L} + d_L \Leftrightarrow d_p = d_{CH} - d_{L-L} - d_L \Leftrightarrow d_p = 250 \text{ mm} - 76,2 \text{ mm} - d_L.$$

Passando agora para o desfasamento 2, a análise é feita a cada coordenada de cada plano separadamente. As coordenadas dos pares de pontos (P_{DI} , P_{EI} , P_{DS} , P_{ES}) definidos para o alinhamento do plano YOZ (Apêndice II) permitem a determinação da posição da estrutura de calibração relativamente ao instrumento. Relativamente à coordenada X, neste plano não se considera este tipo de desfasamento, pois esta é constante e resultante directamente da posição relativa entre a estrutura de calibração e o instrumento. Para a coordenada Y, sabendo que V_{ADI} encontra-se na posição 13 mm da escala graduada da cantoneira horizontal posterior de cada unidade de contacto e que a coordenada Y do par de pontos que contém este vértice é indicativa da posição deste último relativamente à escala da estrutura de calibração, o desfasamento entre a escala das unidades de contacto do instrumento e a escala da estrutura de calibração é igual a $Y_{DI} - 13 \text{ mm}$ que deve ser adicionado ao valor lido na escala graduada. Para a coordenada Z, sabendo que V_{ADI} encontra-se na origem (0 mm) da régua vertical do instrumento e que a coordenada Z do par de pontos que contém este vértice é indicativa da posição deste último relativamente à escala da estrutura de calibração, o desfasamento entre a escala das unidades de contacto do instrumento e a escala da estrutura de calibração é igual a Z_{DI} que deve ser adicionado ao valor lido na escala graduada. No plano XOZ, o

raciocínio é análogo ao anterior. A variável constante (Y) é resultante directamente da posição relativa entre a estrutura de calibração e o instrumento. O seu desfasamento é definido pela posição relativa entre as escalas das unidades de contacto do instrumento e as folhas de papel milimétrico da “face lateral” da estrutura de calibração. Mais concretamente, pela posição das estruturas (veios verticais) onde a régua de posicionamento é apoiada (valor -4 mm da escala da coordenada Y das peças de acrílico do instrumento), pela distância entre as faces laterais desta última (25 mm) e pela distância entre as faces laterais da estrutura de calibração (espessura da placa de madeira (10 mm)). Para a coordenada X, é necessário contabilizar o desfasamento entre a escala da estrutura de calibração e a escala do instrumento. As coordenadas X_i e X_s medem a distância entre as duas estruturas desde a extremidade anterior das placas do sistema de suporte até à extremidade posterior da estrutura de calibração, sendo necessário adicionar a distância desde a extremidade da estrutura de calibração até à origem da coordenada X nas folhas de papel milimétrico (10 mm) e ainda a distância entre a face anterior da estrutura de calibração e a cantoneira horizontal anterior de cada unidade de contacto (-0,6 mm), ou seja, $X_i - 0,6 \text{ mm} + 10 \text{ mm}$. Para a coordenada Z, a medição em Z_i resulta da distância desde a face superior da placa do sistema de suporte, que corresponde ao valor 0 mm (origem) da régua vertical do instrumento, até à posição desse par de pontos na escala Z da estrutura de calibração. Esta representa o desfasamento entre a escala da régua vertical do instrumento e a escala da estrutura de calibração que é igual a Z_i e que deve ser adicionado ao valor lido na escala graduada. Todas estas correcções são compiladas na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Correcção aos valores medidos e esperados

| Valores | Plano | Coordenada | Correcção |
|---|-------------|------------|--|
| M E D I D O S | X O Z | X | $X_{MXOZ} = 250 \text{ mm} - 76,2 \text{ mm} - (X_L + (X_i - 0,6 \text{ mm} + 10 \text{ mm}))$ |
| | | Y | $Y_{MXOZ} = Y_L + 2 \text{ mm} - (10 \text{ mm} + 25 \text{ mm} - 4 \text{ mm})$ |
| | | Z | $Z_{MXOZ} = Z_L - 3 \text{ mm} + Z_i$ |
| | Y O Z | X | $X_{MYOZ} = 250 \text{ mm} - 76,2 \text{ mm} - (X_L)$ |
| | | Y | $Y_{MYOZ} = Y_L - 13 \text{ mm} + 2 \text{ mm} + Y_{DI}$ |
| | | Z | $Z_{MYOZ} = Z_L - 3 \text{ mm} + Z_{DI}$ |
| E S P E R A D O S | X O Z | X | $X_{EXOZ} = X_p + \Delta X_{XOZ}$ |
| | | Y | $Y_{EXOZ} = 12 \text{ mm} + \Delta Y_{XOZ}$ |
| | | Z | $Z_{EXOZ} = (Z_p + \Delta Z_{XOZ}) + Z_{PMXOZ}$ |
| | Y O Z | X | $X_{EYOZ} = X_{DI} - 0,6 \text{ mm}$ |
| | | Y | $Y_{EYOZ} = Y_p$ |
| | | Z | $Z_{EYOZ} = Z_p + Z_{PMYOZ}$ |

5.5.2.3 Conjunto dos erros da medição

O conjunto dos erros da medição, resultante da diferença entre os valores esperados e os valores medidos é apresentado em gráficos, por coordenadas associadas a todos pontos. A distribuição do erro da medição associada a cada coordenada de cada ponto (representada por barras) está centrada em torno da origem para poderem ser comparadas entre pontos diferentes. Para além disso, com um “X” é apresentada a respectiva média do erro da medição de cada coordenada de cada ponto. Antes de se iniciar a análise dos gráficos, há um aspecto essencial deste estudo estatístico, que tem de ser referido. Os pressupostos de uma avaliação estatística dos resultados associados ao teste *t-student* e, possivelmente, a outros testes aplicáveis à distribuição normal, não podem ser executados. Este tipo de testes, como foi referido, é concebido para populações com distribuição normal ou tendencialmente normal. Os resultados deste teste revelaram que os valores medidos em algumas variáveis de algumas coordenadas, não apresentam uma distribuição normal. Logo, os pressupostos seguidos na planificação do tratamento estatístico não estão de acordo com as verdadeiras características da amostra de dados de medição. É então necessário utilizar uma estratégia alternativa. A aplicação do método de acordo com a distribuição de *t-student* já não é relevante para a análise dos dados. Consequentemente, a representação da dispersão dos dados da amostra pelo desvio padrão também não é relevante, pois não se podem determinar os limites associados aos intervalos de confiança, segundo os métodos anteriormente definidos. Alternativamente, opta-se por definir a distribuição da amostra como o erro da medição com maior valor absoluto, para cada coordenada de cada ponto. O intervalo gerado é ampliado para ambos os lados do valor central, obtendo-se uma distribuição rectangular. Apesar de este método não ser conter tanto informação da população como o método pretendido, é suficiente para fazer uma análise inicial ao desempenho do protótipo desenvolvido.

Figura 5.2 - Gráfico da média e dispersão do erro da medição da coordenada X (plano YOZ)

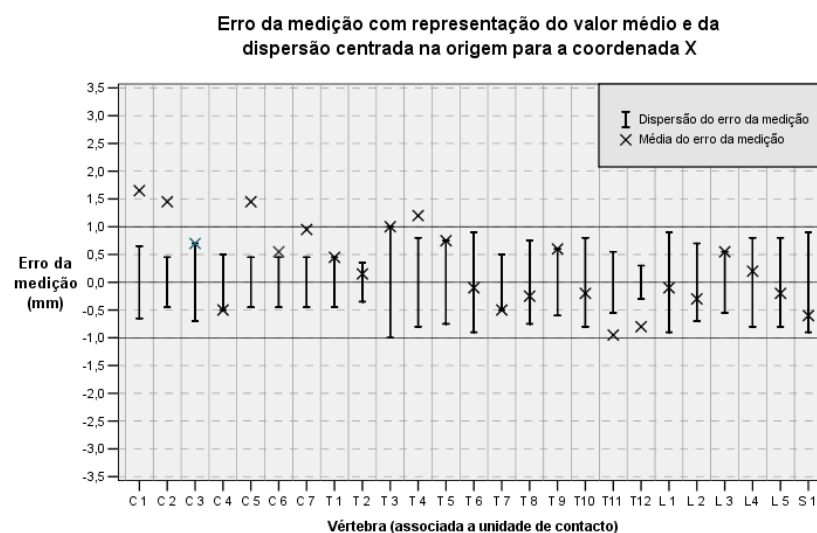


Figura 5.3 - Gráfico da média e da dispersão do erro da medição da coordenada Y (plano XOZ)

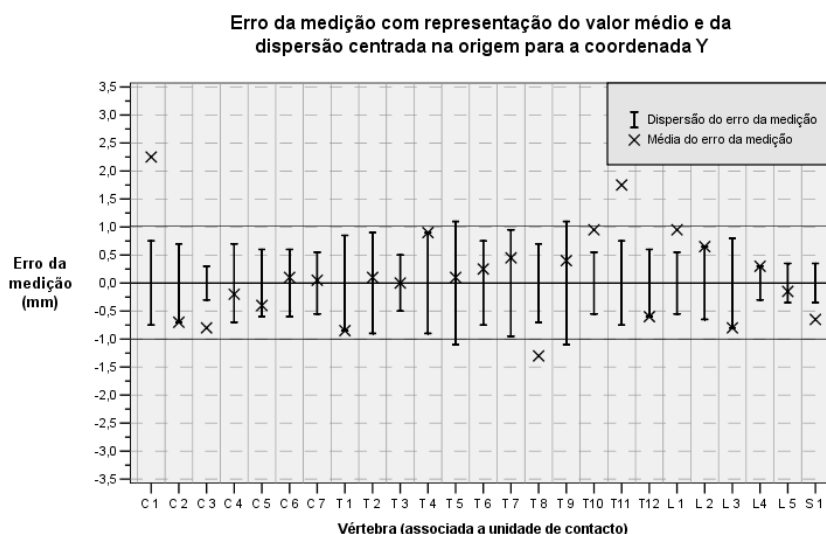
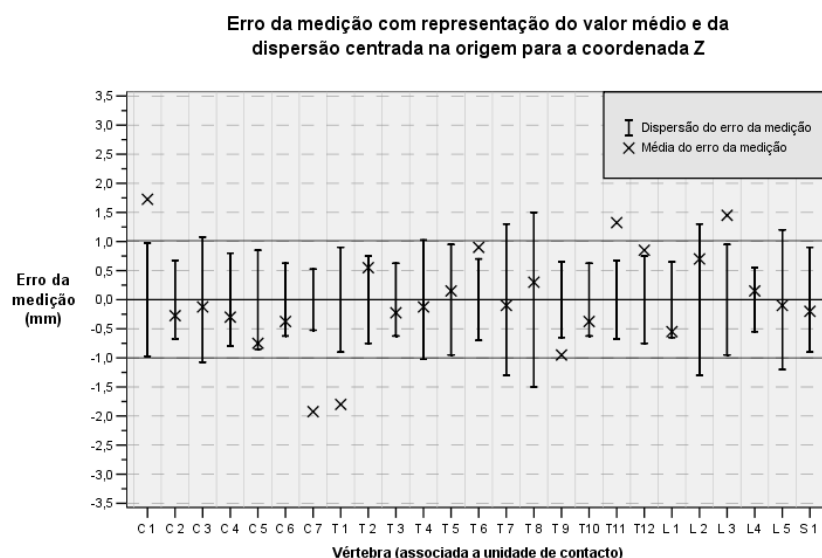


Figura 5.4 Gráfico da média e distribuição do erro da medição coordenada Z (plano XOZ + plano YOZ)



Os gráficos das Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam a média (com uma cruz) e o intervalo de dispersão (definido anteriormente) do conjunto de erros da medição das coordenadas X, Y e Z (respectivamente) de todos os pontos marcados. O intervalo de dispersão está centrado na origem para se poder comparar os erros da medição entre unidades de contacto e em relação ao limite dos requisitos (± 1 mm). Este último é representado por duas linhas a 1 mm do referencial.

No gráfico da Figura 5.2, todos os conjuntos de erros da medição por unidade de contacto apresentam a sua média (valor esperado) desfasada do valor esperado, apesar de, na maioria dos casos (84%) encontrarem-se dentro do intervalo ± 1 mm de erro da medição. Em termos de dispersão, todos os conjuntos de erros da medição estão dentro do intervalo ± 1 mm, havendo só um caso (T3) no limite deste intervalo. Cerca de um terço (8 unidades de contacto) apresentam uma dispersão de $\pm 0,5$ mm

No gráfico da Figura 5.3, também todos os conjuntos de erros da medição por unidade de contacto apresentam a sua média (valor esperado) desfasada do valor esperado, apesar de, na maioria dos casos (88%), encontram-se dentro do intervalo $\pm 1\text{mm}$ de erro da medição. Em termos de dispersão, quase todos os conjuntos de erros da medição estão dentro do intervalo $\pm 1\text{mm}$, excluindo as unidades de contacto associadas as vértebras T5 e T9.

Por fim, no gráfico da Figura 5.4, também todos os conjuntos de erros da medição por unidade de contacto apresentam a sua média (valor esperado) desfasada do valor esperado, apesar de, na maioria dos casos (80%), encontram-se dentro do intervalo $\pm 1\text{mm}$ de erro da medição. Em termos de dispersão, cerca de um quarto (24%) dos conjuntos de erros da medição estão acima do intervalo $\pm 1\text{mm}$. Destes, duas unidades de contacto apresentam excesso marginal em relação ao intervalo definido nos requisitos e apenas uma terceira unidade de contacto apresenta uma dispersão de $\pm 1,5\text{ mm}$. Nesta coordenada, nenhuma barra de dispersão se encontra dentro do intervalo $\pm 0,5\text{ mm}$.

5.5.2.4 Análise dos dados obtidos

Analisando os resultados obtidos, eles não são totalmente satisfatórios em nenhuma das coordenadas. Cerca de 17% (13 em 75) dos conjuntos de erro da medição que formam cada coordenada da unidade contacto associada a cada vértebra apresentam intervalos de dispersão maiores que $\pm 1\text{ mm}$, mas nenhuma ultrapassa o intervalo de dispersão $\pm 1,5\text{ mm}$. Ou seja, as coordenadas com resultados não satisfatórios, não apresentam valores muito acima dos limites pretendidos.

Numa outra perspectiva, analisando por unidades de contacto associadas às respectivas vértebras, 8 (32%) destas apresentam intervalos de dispersão maiores que $\pm 1\text{mm}$ em pelo menos uma coordenada. Apesar de este valor ser significativo, ele não é maioritário, logo a probabilidade de uma unidade de contacto cumprir satisfatoriamente um conjunto de medições é relativamente alta.

Deste processo de validação pode-se concluir que o instrumento de medição não cumpre totalmente os requisitos definidos no início do projecto de concepção, mas está muito próximo quer no número de pontos medidos satisfatoriamente, quer no grau pouco grave de insatisfação nas unidades de contacto associadas aos erros da medição que não cumpriram os requisitos.

O desempenho global do modelo físico do instrumento concebido, enquanto primeiro protótipo é relativamente satisfatório, mas animador pois perspectiva a possibilidade de melhoria, visto que a gravidade e a quantidade de falhas detectadas no processo de validação é reduzida. Quantificando o desempenho do instrumento: este apresenta uma fidelidade de $\pm 1,5\text{ mm}$, com possibilidade de aumentar a precisão para $\pm 1,0\text{ mm}$, visto cerca de 68% das unidades de contacto apresentarem uma precisão dentro desse intervalo.

5.5.2.4 A incerteza associada ao processo de validação

Neste processo de validação foram aplicadas correcções às medições e aos valores da posição dos pontos de referência, para determinação do erro da medição. Também foi definida a respectiva dispersão, segundo uma distribuição rectangular. No entanto, algumas considerações são apresentadas por último, para não tornar a exposição confusa. Nomeadamente, é necessário abordar a questão da incerteza. Esta, aparentemente, foi apresentada como sendo única. Paralelamente, foram apresentadas correcções, provenientes de factores conhecidos, os quais apresentavam um valor aditivo e constante relativamente às medições e aos pontos de referência. A aplicação destas correcções e possibilidade de se desprezar outras fontes de incertezas tem de ser analisada e justificada. Os valores associados às correcções foram aplicados como constantes. No entanto, estes resultam de medições com uma incerteza associada. Mais concretamente, pode-se considerar a incerteza associada à (1) régua de aferição do papel milimétrico, (2) à régua de posicionamento e (3) à craveira (de medição da posição dos alfinetes). Ainda se pode considerar a (4) incerteza associada à leitura da medição de cada um destes valores. Paralelamente, também é necessário considerar a incerteza associada às (5) escalas de cada sistema de cada unidade de contacto do instrumento e à (6) leitura das respectivas medições dos pontos de referência. É ainda necessário considerar (7) desvios na construção mecânica, mais concretamente, a folga nos sistemas de guiamento, o paralelismo e o rectilismo das estruturas correspondentes e ainda a previsão do erro de Abbe.

A contabilização de mais que uma incerteza associada a uma medição implica a determinação da incerteza combinada da medição. Considera-se que todas as incertezas referidas não têm relação directa entre si, logo pressupõe-se que estas incertezas são independentes, não havendo correlação directa entre elas. Perante este cenário, a incerteza combinada associada a uma medição é igual à raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas individuais. Desta igualdade resulta que, uma incerteza com um intervalo correspondente a menos de 10% do intervalo da incerteza maior pode ser desprezada [38]. Considerando que a incerteza encontra-se entre ± 1 mm e $\pm 1,5$ mm, qualquer incerteza que apresente um intervalo com $\pm 0,1$ mm pode ser desprezada.

Analisando as diferentes incertezas apresentadas, começa-se pela incerteza associada à leitura das medições (4 e 6). Esta depende da capacidade de medição do utilizador do instrumento. Todas as medições foram efectuadas pelo mesmo utilizador e seguindo as recomendações típicas para evitar erros de leitura de escalas graduadas, como o erro de paralaxe. Logo, considera-se que estas incertezas são aleatórias e impossíveis de ser determinadas. A craveira utilizada (3) estava calibrada, apresentando uma incerteza de $\pm 0,03$ mm. As régua (1 e 2) utilizadas estavam calibradas de forma a apresentar desvios de $\pm 0,05$ e $\pm 0,1$ mm respectivamente. As régua aplicadas ao instrumento (5),

nomeadamente, ao eixo X e Z utilizadas estavam calibradas de forma a apresentar desvios de $\pm 0,03$ e $\pm 0,1$ mm, respectivamente. As escalas gravadas (5) em cada unidade de contacto (para o eixo Y) foram calibradas com uma craveira calibrada para desvios de $\pm 0,05$ mm, não apresentando quaisquer desvios, assumindo-se que o desvio das escalas gravadas seja $\pm 0,1$ mm (com um factor 2 de segurança). Ou seja, todos os instrumentos e escalas utilizados apresentam incertezas que podem ser desprezadas. Relativamente às réguas (1, 2 e 5), por serem metálicas, pode haver uma incerteza associada à sua expansão por alteração da temperatura ambiente. No entanto, todas as medições foram efectuadas num único laboratório, o qual apresenta uma temperatura ambiente regular, considerando-se que a incerteza associada a este efeito também pode ser desprezada. Por fim, na incerteza associada a factores mecânicos (7), considera-se que há uma incerteza que não se possa desprezar. Nomeadamente, a cremalheira horizontal, por ser composta por polímero acetal, apresenta uma resistência à flexão insatisfatória. De facto, considera-se que este elemento mecânico possa ser uma fonte importante na incerteza associada à dispersão ao erro da medição. Prevê-se que o seu efeito seja mais notório nos eixos Y e Z, visto o comprimento ser a sua dimensão com valor muito maior que as largura e a altura. Perante este cenário, não se considera significativa a aplicação da previsão do erro de Abbe. Esta última associa um desvio rotacional a qualquer medição translacional rectilínea com instrumentos mecânicos, que por sua vez origina um desvio na direcção perpendicular a esta última. Este desvio é calculado a partir do produto do seno do ângulo do dito desvio rotacional com a distância compreendida entre o centro de rotação e a extremidade associada à medição translacional rectilínea. A nível de outros desvios na construção mecânica, os elementos maquinados foram medidos e rectificados quando necessário. Os dados correspondentes não estão expostos nesta dissertação. Além disso, a concepção desenvolvida para os sistemas de guiamento foi desenhada para contrariar o efeito de folgas nos sistemas de guiamento, nomeadamente, através de 4 chumaceiras com veios rectificados por cada unidade de contacto, a aplicação das cantoneiras sobre faces rectificadas da região B do nível Z e do nível Y, em cada unidade de medição e ainda a utilização de elementos de engrenagem fabricados por molde no nível X.

O resultado deste processo de validação deve ser o ponto de partida para a revisão dos conceitos e parâmetros técnicos seleccionados previamente. Desta revisão espera-se que se detecte os pontos fracos dos conceitos desenvolvidos e que estes sejam corrigidos. Posteriormente a essa fase, este processo de validação deve ser repetido e os resultados comparados, definindo o grau da capacidade de amadurecimento deste projecto de concepção, ou seja, a perspectiva de progressão rumo ao seu desenvolvimento comercial.

6. Discussão

Ao longo deste trabalho foi apresentado a concepção, fabrico, montagem e validação de um protótipo de um instrumento de medição. Este tem como função medir as curvaturas e os desvios laterais de pessoas na posição erecta. Seguindo a teoria de projecto mecânico definiram-se opções que foram seleccionadas e posteriormente aplicadas num protótipo. Por fim procedeu-se à avaliação do protótipo por um processo de validação. Esta última fase foi exposta no capítulo 5. Apesar de todo este processo poder ser analisado ao longo de cada fase do projecto mecânico de concepção, como este é iterativo, a sua discussão deve centrar-se na última fase: a avaliação do produto desenvolvido. As conclusões da análise desta fase podem remeter o projecto de concepção para qualquer uma das outras fases do processo [37].

A fase de avaliação do modelo físico não ocorreu como se tinha planeado: não se confirmou a normalidade da distribuição do conjunto de leituras por cada coordenada de cada ponto medido. Duas razões podem justificar este cenário:

- a) Os dados não têm uma distribuição normal;
- b) Os dados não foram adquiridos de forma a se poder avaliar a sua distribuição.

Perante o cenário a), deixa de ser possível afirmar que a distribuição da população da amostra recolhida apresente normalidade. Para se poder determinar a precisão da medição com maior robustez seria necessário aplicar o teorema do limite central e, conseqüentemente ter uma amostra da população com pelo menos 30 leituras de medições por coordenada.

Tipicamente, as medições feitas por instrumento por comparação directa de escala por pessoas tendem para uma distribuição normal, teoricamente em torno do valor real. Esta afirmação supõe que os elementos que influenciam a medição não causam nenhuma simetria no sistema que influencie a medição. Durante o processo de fabrico, as peças e elementos usados podem ter sido danificados de uma forma não perceptível directamente, mas que crie uma instabilidade nos sistemas de medição e conseqüente geração de assimetria. Este cenário transformaria uma medição aleatória, numa medição “viciada” e possivelmente com uma distribuição não-paramétrica (não normal).

Por outro lado, no cenário b), a questão não está na distribuição estatística das leituras, mas sim na forma como a leitura é feita. Os valores lidos têm um intervalo mínimo de 0,5 mm (resolução da escala). Conseqüentemente a sua representação gráfica deve ser feita através de um gráfico de distribuição de frequências. Tipicamente, recomenda-se que os gráficos sejam construídos de tal forma que o número de intervalos de classes seja entre 5 e 20 [38, 39, 59], dependendo também da

amostra recolhida, ou seja, do número de leituras efectuadas. No entanto, alguns dos conjuntos de leituras de uma coordenada de um ponto apresentam apenas valores em dois intervalos de classes ou em três intervalos criando uma forma de escada. Este tipo de configurações não se adequa com a distribuição normal, por isso, a análise do teste de Kolmogorov-Smirnov resulta na determinação da ausência de distribuição gaussiana de alguns conjuntos de leituras. Se se verificar que o cenário b) é o verdadeiro, a forma mais simples de o contornar é o aumento da resolução nos sistemas de medição do instrumento. Esta solução é simples, mas não é fácil. As duas hipóteses mais simples de aplicar esta solução são a utilização de um nónio nas escalas do sistema de medição do instrumento ou a medição auxiliar com uma craveira. Qualquer uma destas opções só é eficiente se as marcações nas escalas graduadas forem estreitas e bem definidas. A redução da resolução de $\pm 0,5\text{mm}$ para $\pm 0,25\text{ mm}$ provavelmente é suficiente para resolver esta questão. No entanto, é necessário atender que o aumento do número de intervalos de classes exige um aumento do número da amostra, para que o gráfico tenha robustez suficiente para apresentar pelo menos uma classe predominante (central se a distribuição for gaussiana).

Apesar da ampla capacidade de cálculo estatístico em torno de distribuições gaussianas, no processo de análise estatística dos dados recolhidos não se optou pela solução descrita anteriormente. Considerando que a distribuição dos dados é reduzida, opta-se por se seguir uma análise estatística mais simples. Mais concretamente, as amostras recolhidas são definidas pela média de cada conjunto de leituras (a qual assume o valor central desse conjunto) e a sua distribuição é determinada pela diferença entre o valor da média e o valor da leitura com valor mais distante da média. Assume-se este último valor como o limite mínimo e máximo da distribuição em relação à média. Esta opção não permite determinar intervalos de confiança, mas possibilita definir o alcance da distribuição da amostra recolhida. Ou seja, esta análise não é tão robusta quanto a que se planeou, mas é suficiente para determinar a capacidade de medição do instrumento. Esta última cumpre o objectivo desta validação, pois esta é a avaliação do primeiro protótipo, que poderá ser alterado.

Os dados recolhidos já foram analisados no capítulo anterior. Nesta fase é necessário avaliar as conclusões descritas na referida análise. A resolução de $\pm 1,5\text{ mm}$ determinada pelo processo de validação não corresponde ao valor definido nos requisitos do projecto de concepção. Mas como esta característica só é verificada em 32% das unidades de contacto, considera-se que o protótipo, se revisto, possa assumir a precisão exigida pelos requisitos. Note-se que não se detectou, à partida, nenhum factor comum nas unidades de contacto que não cumprem os requisitos. Durante as diferentes fases do projecto de concepção, diferentes deficiências foram detectadas que, por alguma razão não puderam ser alteradas ou ajustadas. A definição destas deficiências e posterior correcção

são um ponto de partida para melhorar o desempenho das unidades de contacto individualmente. As alterações sugeridas são:

1) As cremalheiras horizontais, por serem compostas pelo polímero acetal e serem maciças, não apresentam uma resistência à flexão satisfatória. Apesar de ser difícil encontrar elementos de tracção finos e alongados, sugere-se que uma roda de atrito e um perfil metálico de base quadrangular possam apresentar um desempenho melhor. A estrutura metálica e tubular do perfil é muito resistente à flexão e simultaneamente leve, logo esta opção pode ter um desempenho melhor que o sistema pinhão/cremalheira horizontal. Se estes elementos existirem com as mesmas dimensões que o pinhão e a cremalheira, pode-se proceder à substituição directa sem mais alterações. Para além disso, como o perfil é metálico, pode-se gravar nele a escala para o sistema de medição do eixo X, tal como se fez na cantoneira horizontal posterior da unidade de contacto.

2) O sistema de suporte tem cerca de 1800 mm de altura e a sua base é relativamente estreita. Para uma maior estabilização deste sistema e das unidades de contacto, pode-se acrescentar na região posterior da plataforma do instrumento, um perfil horizontal fixo por baixo da placa da região inferior do sistema de suporte e apoiado por dois pilares fixos na plataforma e paralelos ao perfil da região inferior do sistema de suporte. Ainda se podem acrescentar dois varões fixos aos topos desses pilares e no centro das faces esquerda e direita.

3) Apesar da engrenagem pinhão/cremalheira vertical estar centrada sobre os apoios do sistema de guiamento do eixo Z (veios verticais), estes últimos estão muito próximos uns dos outros. Se estivessem mais afastados em relação ao eixo Z, a unidade de contacto estaria mais estabilizada. No entanto, esta alteração só é possível com a maquinação de novas unidades de contacto, por isso só deve ser considerada perante esse cenário.

4) Seguindo o conceito de roda de atrito apresentado na opção 1, o nível X poderia ter um mecanismo para o seu sistema de tracção composto por um tubo de 3 mm metálico, deslocado por uma roda de atrito. O Nível X teria um furo passante de 3 mm. Consoante a tolerância do furo e do tubo, o sistema poderia ter uma folga mínima que permitisse o seu movimento apenas ao longo do eixo X, conferindo-lhe elevada estabilidade.

5) A altura da unidade de contacto é uma questão delicada. Apesar de se querer que esta seja a mais baixa possível, quanto mais alta for, melhor será o seu guiamento. No entanto, se houver necessidade de diminuir a sua altura, essa mudança teria de ser feita a partir da região B do nível Z e dos níveis Y e X, pois a altura da região A pode ser rebaixada com facilidade pelo menos 5 mm. Neste conceito, é feito um rasgo central ao longo do eixo Y na região B. Este rasgo pode ter forma triangular invertida, trapezoidal, quadrangular ou rectangular. O nível Y seria modificado, para ter a

forma complementar a esse rasgo, ficando inserido neste último rasgo e sendo guiado por ele. Nesta configuração, o nível Y só tem um furo roscado para receber o veio roscado do sistema de tracção do eixo Y. Sobre o nível Y estaria o nível X que assumiria uma forma diferente consoante o sistema que se usasse (pinhão/cremalheira; sugestão 1); sugestão 4)).

6) Para se diminuir o peso da unidade de contacto podem-se abrir janelas (furações) em ambas as regiões do nível Z. A localização destas janelas teria de ser estudada para não comprometer a estabilidade estrutura da unidade de contacto.

7) A unidade de contacto, por ser composta por acrílico (PMMA) não tem tanta estabilidade nem tanta versatilidade de maquinaria. Alternativamente, poder-se-ia utilizar Duralumínio. Apesar de este ter o dobro da densidade do acrílico, ele permite que seja maquinado com mais precisão e menos exigência técnica. Se a esta opção aplicarmos as sugestões 5 e 6, pode-se conseguir que esta nova unidade de contacto seja mais leve, tenha um desempenho melhor e seja mais baixa do que a unidade de contacto já concebida.

8) Esta sugestão pressupõe o desenvolvimento de uma nova unidade de contacto. Esta configuração teria 10 mm de altura. A sequência dos eixos definida seria alterada para eixo Z – Eixo X – Eixo Y. Estruturalmente, a unidade de contacto só teria nível Z. No interior deste nível estaria uma roda de atrito para traccionar uma barra que se deslocaria ao longo do eixo X. Na extremidade anterior desta barra haveria uma estrutura perpendicular a ela e com uma ponta (sonda) com 5 mm de comprimento. Por um sistema de fita, a sonda era deslocada a partir da extremidade posterior da barra do eixo X. O problema desta configuração é a capacidade da barra do eixo X resistir à flexão forçada pelo momento adicional gerado pela barra do eixo Y.

As sugestões apresentadas, como foi referido anteriormente, são apenas um ponto de partida para a redefinição e melhoramento necessários das características. Ou seja, na nova concepção, uma ou mais sugestões podem ser aplicadas directamente ou, por apresentarem uma solução com uma perspectiva diferente, podem funcionar como inspiração criativa para o desenvolvimento de um novo conceito.

7. Conclusão

Esta tese de mestrado consiste num projecto de concepção, com ênfase na sistematização do processo criativo, consolidado pelo conhecimento técnico desenvolvido em torno dos mecanismos, elementos, estruturas, componentes e processos utilizados. Seguindo o conjunto de objectivos definidos, foram expostas as causas do fenómeno fisio-patológico, as quais conduziram à identificação de uma necessidade: um instrumento não invasivo de medição das curvaturas e desvios laterais compatível com a aplicação em mulheres grávidas. Consequentemente foram apresentadas as diferentes fases associadas ao projecto de concepção. Foram expostos os requisitos do instrumento, criando uma linha de referência para o desenvolvimento da concepção do instrumento de medição. O instrumento foi dividido funcionalmente em sistemas e, para cada um deles, foi concebido um conceito. Apoiado nas diferentes técnicas, normas e princípios de Engenharia Mecânica e de Materiais, analisaram-se os diversos parâmetros associados a esses conceitos. Este trajecto culminou com a construção de um modelo físico – um protótipo – o qual foi avaliado.

O protótipo desenvolvido e validado apresentou um desempenho relativamente satisfatório. Apesar do estudo estatístico ter sido mais simplificado do que inicialmente previsto, o protótipo define-se como um instrumento de medição com $\pm 1,50$ mm de precisão. Este tem forte probabilidade de ser melhorado, o que possibilitará aumentar a precisão para $\pm 1,00$ mm. Para tal, foram sugeridas várias opções que terão de ser consideradas numa outra fase, aquando da maturação deste projecto mecânico.

Numa fase posterior, pelo facto de ser um método não invasivo, a sua utilização poder-se-á estender a crianças e adultos, particularmente quando for necessário um conjunto elevado de exames, como radiografias, para a avaliação de alterações posicionais das estruturas da coluna vertebral. Perante esse cenário, o instrumento desenvolvido poder-se-á tornar-se um método complementar (diminuindo o número de radiografias e da respectiva radiação incidente) ou, idealmente substituinte desse tipo de exames.

O instrumento poderá ainda ser utilizado em terapia ocupacional ou preventiva, na monitorização de desvios na coluna vertebral e na respectiva correcção por técnicas conservativas. De acordo com esta perspectiva, se aplicada de uma forma sistemática no grupo populacional jovem (nas escolas), resultará na diminuição da probabilidade desse grupo populacional jovem, numa idade mais avançada, ter uma redução de mobilidade precoce. Para além do aumento da qualidade de vida, este cenário possibilita a redução do grupo populacional com um grau de imobilidade elevado e consequente redução dos custos públicos de saúde e logística inerentes a dito grupo. Consequentemente, o instrumento poderá ser uma ferramenta importante para estratégias preventivas de saúde pública [25].

8. Referências bibliográficas

- [1] [Sem autor definido]. (2006). *Impact of Physical Activity during Pregnancy and Postpartum on Chronic Disease Risk*. Medicine & Science In Sports & Exercise : 38 : 5 : 989-1006.
- [2] Mantle, J. (2004) *Physiotherapy in Obstetrics and Gynaecology*. 2.^a Edição. Elsevier.UK.
- [3] Turgut, F.; Turgut, M.; Cetinsahin, M. (1998). *A prospective study of persistent back pain after pregnancy*. European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology: 80 : 45-48.
- [4] Skaggs, DC; Prather, H.; Gross, G.; George, J.W.; Thompson, P.A.; Nelson, D.M. (2007). *Back and Pelvic Pain in an Underserved United States Pregnant Population - A Preliminary Descriptive Survey*. Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics : 30 : 2.
- [5] Stone, C. (1999). *Science in the Art of Osteopathy – Osteopathic Principles and Practice*. Nelson Thornes, UK.
- [6]Whitcome, K. K.;Shapiro L. J.; Lieberman, D. E. (2007). *Fetal Load and the Evolution of Lumbar Lordosis in Bipedal Hominins*. Nature : 450 : 1075-1078.
- [7] Brinkmann, P.; Frobin, W., Leivseth, G. (2002). *Musculoskeletal Biomechanics*. Georg Thieme Verlag. Stuttgart.
- [8] Vedantam, R.; Lenke, L.G.; Keeney, J.A.; Bridwell, K.H. (1998). *Comparison of Standing Sagittal Spinal Alignment in Asymptomatic Adolescents and Adults*. Spine : 23 : 2 : 211-215.
- [9] Östgaard, H. C.; Zetherström, G.; Roos-Hansson, E. (1997). *Back Pain in Relation to Pregnancy - A 6-Year Follow-Up*. Spine : 22 : 24 : 2945-2950.
- [10] Hirabayashi, Y; Shimizu, R.; Fukuda, H.; Saitoh, K.; Furuse, M. (1995). *Anatomical Configuration of the Spinal Column in the Supine Position. II. Comparison of Pregnant and Non-pregnant Women*. British Journal of Anaesthesia : 75 : 1 : 6-8.
- [11] El-Khoury, G. Y.; Madsen, M.T.; Blake, M.E.; Yankowitz, J. (2003). *A New Pregnancy Policy for a New Era*. American Journal of Roentgenology : 181 : 335-340.
- [12] Jarvike, J.; Deyo, R. A. (2002) *Diagnostic Evaluation of Low Back Pain with Emphasis on Imaging*. Annals of Internal Medicine : 137 : 7 : 586-597.

- [13] Rhoades, R. A.; Bell, D. R. (2003). *Medical Physiology*. 2.^a Edição. Lippincott Williams & Wilkins.
- [14] Rockwell, L.; Vargas, E.; Moore, L. (2003) *Human Physiological Adaptation to Pregnancy - Inter- and Intraspecific Perspectives*. American Journal of Human Biology : 15 : 3 : 330-341.
- [15] Hill, C. C., Pickinpaugh, J. (2008) *Physiologic Changes in Pregnancy*. Surgical Clinics of North America : 88 : 2008 : 391-401.
- [16] Borg-Stein, J.; Dugan, S.; Gruber, J. (2005). *Musculoskeletal Aspects of Pregnancy*. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation : 84 : 180-192.
- [17] Oliveira, L. F.; Vieira, T.; Macedo, A.; Simpson, D.; Nadal, J.(2009). *A Study of Postural Sway During Pregnancy Through Spectral Analysis of Stalbilometric Signals*. European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology : 147 : 1 : 25-28.
- [18] Foti, T.; Davids, J. R.; Bagley, A. (2000). *A biomechanical analysis of gait durring pregnancy*. The Journal of Bone and Joint Surgery : 82 : 625.
- [19] Harrison, D. E.; Janik, T. J.; Harrison, D. D.; Cailliet, R.; Harmon, S. F. (2002). *Can the Thoracic Kyphosis Be Modeled With a Simple Geometric Shape?*. Journal of Spinal Disorders & Techniques: 15 : 3 : 213–220.
- [20] Pina, J.A. Esperança. (1999). *Anatomia Humana da Locomoção*. 3.^a Edição. Lidel. Lisboa.
- [21] Carlson, J. M. (2003). *Clinical Biomechanics of Orthotic Treatment of Thoracic Hyperkyphosis*. Journal of Prosthetics and Orthotics: 15 : 4S : 31-35.
- [22] Harrison, D. D.; Janik, T. J.; Troyanovich S. J.; Holland, B. (1996). *Comparisons of Lordotic Cervical Spine Curvatures to a Theoretical Ideal Model of the Static Sagital cervical spine*. Spine: 21 : 6 : 667-75.
- [23] Keller, T. S.; Colloca, C. J.; Harrison, D. E.; Harrison, D. D.; Janik, T. J. (2005). *Influence of Spine Morphology on Intervertebral Disc Loads and Stresses in Asymptomatic Adults*. The Spine Journal : 5 : 3 : 297-309.
- [24] Edmondston, S. J.; Singer, K. P. (1997). *Thoracic Spine - Anatomical and Biomechanical Considerations for Manual Therapy*. Manual Therapy : 2 : 3 : 132-142.
- [25] Hass, J. S; Jackson, R. A.; Fuentes-Afflick, E.; Stewart, A. L.; Dean. M. L.; Brawarsky, P.; Escobar, G. J. (2004). *Changes in the Health Status of Women During and After Pregnancy*. The Journal of General Internal Medicine : 20 : 45–51.

- [26] Wang, S.(2004). *Low Back Pain During Pregnancy*. Obstetrics & Gynecology : 104 : 1 : 65-70.
- [27] Schlossberg, L.; Zuidema, G. (1997). *The John Hopkins Atlas of Human Functional Anatomy*. 4.ª Edição. The Johns Hopkins University Press.
- [28] Rothman, R. H.; Simeone, F. A. (1992). *The Spine*. 3.ª Edição. Saunders.
- [29] Middleditch, A; Oliver, J. (2008). *Functional Anatomy of the Spine*. 2.ª Edição. Elsevier.
- [30] Cohen, B. J.; Wood, D. L. (2004). *Memmler's The Human Body in Health and Disease*, 10.ª Edição. Lippincott Williams & Wilkins.
- [31] COMISSÃO EUROPEIA, Direcção geral do Ambiente. (2000). *Protecção Contra as Radiações 118 – Directrizes para a Prescrição de Exames Imagiológicos*. Itália.
- [32] Smet, A. A.; Tarlton, M. A.; Cook, L. T.; Fritz, S. L.; Dwyer, S. J. 3rd. (1980). *A Radiographic Method for Three-Dimensional Analysis of Spinal Configuration*. Radiology : 137 : 343-348.
- [33] Deacon, P.; Flood, B. M.; Dickson, R. A. (1984) *Idiopathic Scoliosis in Three Dimensions*. Journal of Bone and Joint Surgery : British Volume : 66-B : Issue 4 : 509-512.
- [34] Oxborrow, N. J. (2000). *Assessing the Child with Scoliosis - the Role of Surface Topography*. Archives of Disease in Childhood : 83 : 453-455.
- [35] Dunk, N. M.; Lalonde, J.; Callaghan, J. P. (2005). *Implications For the Use of Postural Analysis as a Clinical Diagnostic Tool Reliability of Quantifying Upright Standing Spinal Postures From Photographic Images*. Journal of manipulative and physiological therapeutics : 28 : 65 : 386-392.
- [36] Gerthsen, C.; Kneser; Vogel, H.(1998). *Física*. 2.ª Edição (traduzida). Gulbenkian. Lisboa.
- [37] Ullman, D.G. (2003). *The Mechanical Design Process*. 3.ª Edição. McGraw-Hill.
- [38] Bevington, P. R; Robinson, D. K. (2002). *Data Reduction and Error Analysis For the Physical Sciences*. 3.ª Edição. McGraw-Hill, USA.
- [39] Taylor, J. R. (1996). *An Introduction to Error Analysis – The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. 2.ª Edição. University Science Books.
- [40] Van Goethem, J. W. M. (2007) *Spinal Deformities: Imaging Diagnostic Imaging of the Spine and Spinal Cord*. Springer.

- [41] Doody, M. M.; Lonstein, J. E.; Stovall, M.; Hacker, D. G.; Luckyanov, N.; Land, C. E. (2000). *Breast Cancer Mortality After Diagnostic Radiography - Findings From the U.S. Scoliosis Cohort Study*. Spine : 25 : 16 : 2052-63.
- [42] D’Osualdo, F.; Schierano, S.; Soldano, F. M.; Isola, M. (2002). *The Evaluation of the Spine Through the Surface*. European Medical Physics : 38 : 147 – 152.
- [43] Norton, B. J.; Ellison, J. B. (1993). *Reliability and Concurrent Validity of the Metrecom for Length Measurements on Inanimate Objects*. Physical Therapy : 73 : 4 : 266-274.
- [44] D’Apuzzo, N. (2006). State of the Art of the Methods for Static 3D Scanning of Partial or Full Human Body. 3D Modelling, Proceedings of Conference, June 13-14, Paris, France.
- [45] Hecht, E.(2002). *Óptica*. 2.^a Edição (traduzida). GULBENKIAN. Lisboa.
- [46] Santiago, R. R. (1999). *Topographic Measurements of Non-rotationally Symmetrical Concave Surfaces Using Ronchi Deflectometry*. Universitat Politecnica de Catalunya.
- [47] Rey, M. M. (2002). *Valoración de Técnicas de Luz Estructurada en la Determinación de Deformidades del Raquis*. Universitat de Valencia.
- [48] Zsidai, A., Kocsis, L. (2006). *Ultrasound Based Measuring-diagnostic and Muscle Activity Measuring System for Spinal Analysis*. Technology and Health Care : 14 : 4-5 : 243-250.
- [49] FARO®. *The Faro®Gage*.
http://www.faro.com/FaroIP/Files/File/Brochures/UK_brochure_FARO_gage.pdf
[online – citação: 16 de Setembro de 2007].
- [50] Leroux, M. A.; Zabjek, K.; Simard, G.; Badeaux, J.; Coillard, C.; Rivard, C. H. (2000). *Noninvasive Anthropometric Technique for Measuring Kyphosis and Lordosis*. Spine : 25 : 13 : 1689-1694.
- [51] Chen, Y. L. (1999). *Geometric Measurements of the Lumbar Spine in Chinese Men During Trunk Flexion*. Spine: 24 : 7 : 666-669.
- [52] Quaresma, C. (2006). *Alterações que ocorrem durante a gravidez*. Faculdade de Ciência e Tecnologia. Monte da Caparica, Portugal.
- [53] Pahl, G. (1998). *Engineering Design*. 2.^a Edição. Springer.
- [54] Childs, P. (2004). *Mechanical Design*. 2.^a Edição . Elsevier. UK.
- [55] Budynas; N. (2006). *Shingley’s Mechanical Engineering Design*. 8.^a edição. McGraw-Hill.

- [56] Jones, F. D.; Horton, H. L., Ryffel, H. H.(2004). *Machinery's Handbook*. 27.ª Edição Industrial Press. NY.
- [57] Silva, A; Ribeiro, C. T.; Dias, J.; Sousa, Luís. (2004). *Desenho Técnico Moderno*. 7.ª Edição. Lidel. Lisboa.
- [58] Sclater, N.; Chironis, N. (2001). *Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook*. 3.ª Edição. McGraw-Hill.
- [59] Santos, J. P.; Laranjeira, M. F.(2004). *Métodos Matemáticos para Físicos e Engenheiros*. Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia. Monte da Caparica, Portugal.
- [60] Campbell, P. D. Q. (1995). *An Introduction to Measurement and Calibration*. Industrial Press. NY.
- [61] Callister, W. D. (2006). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7.ª Edição. Wiley.
- [62] Spiegel, M. (1985). *Estatística*. 2.ª Edição (traduzido) McGraw-Hill, Brasil.

APÊNDICE I Fabrico do protótipo

I.1 Tabela 015 – Listagem dos elementos e estruturas do protótipo fabricado

| Elemento | N.º | Sist. | Forma e Dimensões | Material |
|---|-----|-------|--|---------------------------|
| Apoios | 1 | SP | Tronco de cone (\varnothing 31,5 mm x 14 mm) ⁽⁴⁾ seccionada horizontalmente a 10,5 mm de altura. Centro da base do cone em plástico (\varnothing 24 mm x 1,5 mm) ⁽⁴⁾ . Sobre a superfície seccionada ascende um veio roscado (M10 x 30 mm) ⁽⁴⁾ (norma: ISO 68-1:1998). | Plástico e aço inoxidável |
| Porcas dos apoios | 2 | SP | Porca M10 (norma: ISO 4032; DIN 934). | Aço zincado |
| Plataforma | 3 | SP | Chapa/folha (550 mm x 550 mm x 5 mm) ⁽¹⁾ . Arestas e vértices arredondados. | Aço ST 37 (pintado) |
| Cantoneira da plataforma | 4 | SP | Cantoneira de abas simétricas e perpendiculares, (30 mm x 30 mm x 580 mm x 3 mm) ⁽²⁾ . | Aço ST 37 (pintado) |
| Tapete da plataforma | 5 | SP | Folha de borracha pitonada (550 mm x 550 mm x 2 mm) ⁽¹⁾ , com um furo passante rectangular (50 mm x 100 mm x 2 mm) ⁽¹⁾ . | Elastómero (SBR) |
| Perfil rectangular | 6 | SS-RI | Tubo de base rectangular com arestas laterais arredondadas (50 mm x 100 mm x 765 mm x 2 mm) ⁽²⁾ . | Aço ST 37 (pintado) |
| Placa SS-RI | 7 | SS-RI | Placa Prismática rectangular (75 mm x 110 x 20 mm) ⁽¹⁾ . Tem quatro furos roscados M6 (norma: ISO 68-1:1998) dispostos na vertical e simétricos em relação aos planos XOZ e YOZ. | Aço ST 37 |
| Placa Inferior SS-RS | 8 | SS-RS | Placa paralelepípedica (75 mm x 110 x 15 mm) ⁽¹⁾ . Tem sete furos passantes verticais: a) um com forma de bastonete (\varnothing 8 mm x 11 mm x 15 mm) ⁽⁵⁾ , rebaixado na face superior também com forma de bastonete (\varnothing 13 mm x 16 mm x 7 mm) ⁽⁵⁾ ; b) dois circulares (\varnothing 7 mm) ⁽³⁾ , rebaixados na face superior (\varnothing 12 mm x 7 mm) ⁽⁴⁾ ; c) quatro circulares (\varnothing 7 mm) ⁽³⁾ , rebaixados na face inferior (\varnothing 12 mm x 7 mm) ⁽⁴⁾ e na face superior (\varnothing 7 mm x 4 mm) ⁽⁴⁾ . | Duralumínio (liga 2024) |
| Placa superior S-RS | 9 | SS-RS | Placa paralelepípedica (75 mm x 80 x 15 mm) ⁽¹⁾ . Tem cinco furos passantes verticais: a) um com forma de bastonete (\varnothing 8 mm x 11 mm x 15 mm) ⁽⁵⁾ , rebaixado na face superior também com forma de bastonete (\varnothing 13 mm x 16 mm x 7 mm) ⁽⁵⁾ ; b) quatro circulares (\varnothing 7 mm) ⁽³⁾ , rebaixados na face superior (\varnothing 12 mm, 7 mm) ⁽³⁾ e rebaixados na face inferior (\varnothing 7 mm, 4 mm) ⁽⁴⁾ . | Duralumínio (liga 2024) |
| Espigões | 10 | SS-RS | Prisma quadrangular (13,8 mm x 13,8 mm x 140 mm) ⁽¹⁾ . Furo roscado vertical (M6 x 20 mm) ⁽⁶⁾ centrado na face inferior. Face superior com arestas chanfradas a 45º e 1,5 mm de altura. | Aço laminado a quente |
| Parafusos de fixação das placas | 11 | SS-RS | Parafuso cabeça sextavado interior: a) (M6 x 30 mm) ⁽⁶⁾ (normas: ISO 4762, DIN 912) para fixação dos veios e dos espigões; b) (M6 x 35 mm) ⁽⁶⁾ (normas: ISO 4762, DIN 912) para fixação da placa SS-RI | Aço Zincado |
| Perfil quadrangular | 12 | SS-RS | Tubo de base quadrangular com arestas laterais arredondadas (16 mm x 16 mm x 1000 mm x 1 mm) ⁽²⁾ . Tem 5 furos passantes numa das faces laterais centrados a 160 mm, 350 mm, 550 mm, 750 mm, 950 mm (em altura) da face inferior do perfil inferior. | Aço perfilado a frio |
| Barra perfil quadrangular | 13 | SS-RS | Placa paralelepípedica vertical (2 mm x 30 mm x 1000 mm) ⁽²⁾ . | Alumínio |
| Porcas de rebitar | 14 | SS-RS | Porca de rebitar M4. Fabricante: Fabory (ID: 69412040030) | Aço (passivado a amarelo) |
| Parafuso de fixação da cremalheira vertical | 15 | SS-RS | Parafuso cabeça sextavado interior (M4 x 20 mm) ⁽⁶⁾ (normas: ISO 4762, DIN 912) | Aço zincado |

| Elemento | N.º | Sist. | Forma e Dimensões | Material |
|----------------------------|-----|---------|---|---------------------------------|
| Cremalheira vertical | 16 | SC-UC/Z | Cremalheira Recta Fresada (15 mm x 15 mm x 999,03 mm) ⁽⁶⁾ M1 (norma: ISO 54:1996). Fabricante: Atlanta Drives Inc. (Ref. 2510100) | Aço C45 (Nº 1.0504) |
| Veios verticais | 17 | SC-UC/Z | Cilindros (Ø12 mm x 1008 mm) ⁽⁴⁾ . Furos roscados verticais (M6 x 20 mm) ⁽⁶⁾ : a) centrado na face inferior; b) centrado na face superior. | Aço cromado a duro CK45 |
| Régua graduada vertical | 18 | SC-UC/Z | Barra vertical (1,8 mm x 30 mm x 1000 mm) ⁽²⁾ . Escala graduada com resolução de 0,5 mm e variabilidade dimensional de 0,5 mm / 1000 mm. | Aço inoxidável cromado opaco |
| Estrutura do Nível Z da UC | 19 | SC-UC/Z | Conjunto de 3 placas paralelepípedicas (partes) fundidos ao longo do eixo Y pela seguinte ordem: 1) (74,25 mm x 70 mm x 15 mm) ⁽²⁾ , 2) (74,25 mm x 100 mm x 5 mm) ⁽²⁾ ; 3) (74,25 mm x 5 mm x 15 mm) ⁽²⁾ . A parte 1) tem nove furos passantes: a) Um furo rectangular, passante e vertical, desviado 0,5 mm do centro (para o lado esquerdo) (20 mm x 53 mm x 15 mm) ⁽¹⁾ ; b) Quatro furos passantes circulares, passantes e verticais (Ø12 mm) ⁽³⁾ , dispostos simetricamente 2 a 2 em relação ao plano YOZ; c) Dois furos circulares, passantes e horizontais (Ø 6 mm) ⁽³⁾ : um na face anterior e outra na face posterior. Os seus eixos longitudinais estão sobrepostos. Os centros dos furos estão a 48 mm da face esquerda da parte 1) e a 7,5 mm da face interior da parte 1). d) Um furo circular, passante e horizontal (Ø 3 mm) ⁽³⁾ , centrado na face direita da parte 1). e) Um furo roscado (M6 x 9 mm) ⁽⁶⁾ (norma: ISO 68-1:1998) passante e horizontal, no centro da face esquerda da parte 1). A parte 1) é rebaixada (20 mm x 9 mm x 1 mm) ⁽¹⁾ nas faces superior e inferior, centrada em no seu furo e) A parte 2 tem quatro furos roscados horizontais escareados (M3 x 9 mm) ⁽⁶⁾ (norma: ISO 68-1:1998). Dois dos furos estão na face anterior 2 da parte 2) e os outros dois na face posterior da parte 2). Cada furo encontra-se à mesma altura que o centro da respectiva face e a 31,25 mm de largura deste ponto A parte 3) tem um furo circular passante horizontal (Ø 3,5 mm) ⁽³⁾ , centrado na face direita da parte 3. | Plexiglas® (PMMA / Acrílico EX) |
| Estrutura do Nível Y da UC | 20 | SC-UC/Y | Placa paralelepípedica (74,2 mm x 30 mm x 5 mm) ⁽¹⁾ . Face superior é rebaixada nas regiões mais anterior e mais posterior (6 mm x 35 mm x 1 mm) ⁽¹⁾ . Tem 3 furos passantes: a) Um furo roscado horizontal (M3 x 30 mm) ⁽³⁾ (norma: ISO 68-1:1998), centrado na face esquerda. Este furo é rebaixado na extremidade direita (Ø3 mm x 12 mm) ⁽⁴⁾ e na extremidade esquerda (Ø3 mm x 8 mm) ⁽⁴⁾ ; b) Dois furos roscados (M3 x 9 mm) ⁽⁶⁾ (norma: ISO 68-1:1998), passantes e verticais. Estes são rebaixados na face superior (Ø6 mm x 1 mm) ⁽⁴⁾ . Também estão dispostos simetricamente a 24,5 mm do plano vertical que contém o eixo longitudinal do furo a) e a 6,5 mm da face direita. | Plexiglas® (PMMA / Acrílico EX) |
| Estrutura do Nível X da UC | 21 | SC-UC/X | Placa paralelepípedica (63 mm x 4,5 mm x 4 mm) ⁽¹⁾ fundida sobre a região não rebaixada da face superior da estrutura do nível Y da UC. Está disposta com a sua face esquerda alinhada com a face esquerda do elemento referido anteriormente. | Plexiglas® (PMMA / Acrílico EX) |
| Pinhão vertical | 22 | SC-UC/Z | Pinhão recto fresado (Ø14 mm x 13 mm) ⁽⁴⁾ M1 (norma: ISO 54:1996). com 12 dentes. Peça original adquirida modificada: a) O tubo de guiamento é eliminado. b) A altura do pinhão é reduzida em 2mm c) Extremidades laterais dos dentes são chanfradas (30º) Fabricante: Atlanta Drives Inc. (Ref. 2110012) | Aço C45 |

| Elemento | N.º | Sist. | Forma e Dimensões | Material |
|-------------------------------------|-----|---------|--|------------------------------|
| Veio do pinhão vertical | 23 | SC-UC/Z | Barra Cilíndrica roscado (M6 x 100 mm) ⁽⁶⁾ (norma: ISO 68-1:1998), chanfrado a 45º na extremidade | Aço zincado |
| Porca recartilhada do nível Z | 24 | SC-UC/Z | Porca recartilhada RM (M6 x Ø 10 mm x 15 mm) ⁽⁷⁾ . | Aço zincado |
| Porca do veio do pinhão vertical | 25 | SC-UC/Z | Porca baixa M6 (norma: ISO 4035; DIN 439 B). | Aço zincado |
| Porca de calote esférica do nível Z | 26 | SC-UC/Z | Porca de calote esférica M6 (norma: DIN 1587 (1987)) | Aço zincado |
| Calço em U horizontal | 27 | SC-UC/Z | Chapa com 1 mm de espessura e 19,5 mm de comprimento, quinada duas vezes, formando perfil em U. Aba central com 15 mm e abas periféricas com 9 mm (9 mm x 15 mm x 9 mm x 19,5 mm x 1 mm). | Aço inoxidável |
| Parafuso recartilhado | 28 | SC-UC/Z | Conjunto de três elementos: a) Porca recartilhada RM (M6 x Ø 10 mm x 15 mm) ⁽⁷⁾ , (norma (para a rosca): ISO 68-1:1998). b) Porca baixa M6 (norma: ISO 4035; DIN 439 B). c) Barra Cilíndrica roscado (M6 x 40 mm) ⁽⁶⁾ (norma: ISO 68-1:1998), chanfrado a 45º na extremidade. O elemento c) recebe os outros dois elementos, estando o elemento a) enroscado numa extremidade do elemento c) contra este último. | Aço zincado |
| Veio roscado | 29 | SC-UC/Y | Barra Cilíndrica roscado (M3 x 135 mm) ⁽⁶⁾ (norma: ISO 68-1:1998) | Aço inoxidável |
| Porca de calote esférica do nível Y | 30 | SC-UC/Y | Porca de calote esférica M6 (norma: DIN 1587 (1987)) | Aço zincado |
| Anilhas do nível Y | 31 | SC-UC/Y | Anilha com chata estreita M3 (norma: ISO 7089; DIN 125-1 A) | Nylon (poliamida) |
| Porcas do nível Y | 32 | SC-UC/Y | Porca M3 (norma: ISO 4032; DIN 934). | Aço zincado |
| Manípulo recartilhado nível Y | 33 | SC-UC/Y | Porca de embutir recartilhada (M3 x Ø 5 mm x 9 mm) ⁽⁷⁾ , (norma (para a rosca): ISO 68-1:1998). | Latão |
| Cantoneiras horizontais | 34 | SC-UC/Y | Cantoneira de abas perpendiculares, (10 mm x 5 mm x 99,5 mm x 1 mm) ⁽²⁾ . Dois furos roscados, passantes, horizontais e escareados (Ø 3 mm) ⁽³⁾ na aba maior. Estes estão a 7,5 mm da aresta de intercepção das duas abas e a 24,5 mm do plano de simetria da cantoneira (perpendicular ao seu eixo longitudinal). Escala graduada de 100 mm com resolução de 1mm na região superior da face exterior da aba maior | Alumínio |
| Parafusos da cantoneira horizontal | 35 | SC-UC/Y | Parafusos de fenda com cabeça de embeber M3 (norma: ISO 2009; DIN 964). | |
| Cremalheira horizontal | 36 | SC-UC/X | Cremalheira Recta (250 mm x 4,5 mm x 4 mm) ⁽⁶⁾ M 0,5 (norma: ISO 54:1996), processada por molde de injeção. Peça original adquirida modificada: esmerilagem da face anterior, tornando-a pontiaguda, assumindo a forma de um círculo central (Ø 1mm) Fabricante: Güdel GmbH (Ref.ZH0525) | Hostaform C® (acetato - POM) |
| Pinhões horizontais | 37 | SC-UC/X | Pinhão recto fresado (Ø 31 mm x 3 mm) ⁽⁴⁾ M 0,5 (norma: ISO 54:1996), com 60 dentes. Peça original adquirida modificada: O tubo de guiamento é eliminado. Fabricante: Güdel GmbH (Ref.SH0560) | Hostaform C® (acetato - POM) |
| Tubos dos pinhões | 38 | SC-UC/X | Tubo (Ø 6 mm x 5 mm) ⁽⁴⁾ com furo interior (Ø 3mm) ⁽³⁾ , vertical e escareado na face superior. | Plexiglas® (PMMA / |

| Elemento | N.º | Sist. | Forma e Dimensões | Material |
|----------------------|-----|---------|--|----------------|
| horizontais | | | | Acrílico EX) |
| Parafusos do nível X | 39 | SC-UC/X | Parafusos com cabeça de embeber com oco cruciforme M3 (norma: ISO 7046; DIN 965). | Aço zincado |
| Chapa do nível X | 40 | SC-UC/X | Chapa (60 mm x 31 mm x 0,8 mm) ⁽¹⁾ com vértices arredondados. Tem dois furos verticais escareados a 12,5 mm da sua face direita e dispostos simetricamente com 49 mm de comprimento entre si. | Aço inoxidável |

SSPA – sistema de posicionamento; SS-RI – região inferior do sistema de suporte; SS-RS – região superior do sistema de suporte; SC – Sistema de controlo; UC (/X – nível X; /Y – nível Y; /Z – nível Z) – unidade de contacto. **Todas as unidades em milímetros.** ⁽¹⁾ – (comprimento x largura x altura); ⁽²⁾ – (comprimento x largura x altura x espessura); ⁽³⁾ – (Ø diâmetro); ⁽⁴⁾ – (Ø diâmetro x altura ou profundidade); ⁽⁵⁾ – (Ø diâmetro x largura x profundidade); ⁽⁶⁾ – (rosca métrica x profundidade); ⁽⁷⁾ – (roca métrica x Ø diâmetro x altura).

I.2 Custos associados à construção do protótipo

| Elemento | Forma e Dimensões | Preço (€) (Com IVA) | Total (€) |
|---|--|---|-----------|
| Unidade de contacto inicial | Fornecimento do Acrílico e maquinaria das respectivas formas de todos os níveis | 625 | 625,00 |
| Rectificação da unidade de contacto | Rectificação das faces anterior e posterior de todas as unidades de contacto (nível Z e nível Y). Furação para passagem dos veios verticais. | 40h * 30€/h | 1200,00 |
| Cremalheira e pinhões | Aquisição Maquinação (furação da cremalheira, rebaixo dos pinhões e chanfragem dos dentes) | (42,30 + 7,13*25) (2h * 30 €/h) | 258,30 |
| Perfil quadrangular, cantoneiras e espigões | Aquisição Maquinação (furação do perfil; corte, chanfragem, furação e roscagem dos espigões) | (4,79 + 6,75 +6,60 +4) (3h * 30 €/h) | 112,14 |
| Régua de medição vertical | Aquisição | 45 | 45,00 |
| Parafusaria | Aquisição | 34 | 34,00 |
| Plataforma e Perfil rectangular | Material (base e tapete) Maquinação (Corte, furação, montagem, soldadura, limpeza, pintura e colagem) | (18 + 13,2) (6h * 30€/h) | 211,20 |
| Placas do sistema de suporte | Material Maquinação | 5,4 (5h * 30€/h) | 155,40 |
| Veios rectificad (4) | Material Maquinação (corte, furação, roscagem) | 46,37 (6 * 30€/h) | 226,37 |
| Apoios | Aquisição | 4,39 | 4,39 |
| Pinhões e cremalheiras horizontais | Aquisição | 70,38 | 70,38 |
| Total | | | 2942,18 |

APÊNDICE II Validação

II.1 Estrutura de calibração

II.1.1 Definição de uma necessidade

O projecto de concepção de um instrumento de medição exige, entre outros passos, a avaliação de um modelo físico. Esta última necessita de um conjunto de elementos com características bem definidas e conhecidas, adequados ao protótipo do instrumento de medição, de forma a poderem ser medidos por este último. Na concepção do instrumento, exposta ao longo deste trabalho, existe uma situação semelhante à descrita anteriormente. Consequentemente, há a necessidade de se construir uma estrutura que possa representar um conjunto de pontos de referência e que, simultaneamente, o protótipo possa ser aplicado sobre esta.

II.1.2 Requisitos e especificações

A concepção da estrutura de calibração exige uma definição sólida sobre o que se espera dela. Esta tem de considerar que:

- a) O volume de medição do protótipo encontra-se sobre a sua plataforma.
- b) Os pontos que este mede são tridimensionais.
- c) A posição dos pontos marcados tem de ser fidedigna, ou seja, estes têm de ser definidos com elevado rigor.

Como resultado destas considerações, pode-se definir que a estrutura de calibração tem de ter:

- 1) Os seus pontos de referência sobre a plataforma do protótipo.
- 2) Ser capaz de representar todos os pontos do conjunto de pontos de referência. No entanto, idealmente esta representação dever-se-ia estender para todo o volume de medição do protótipo (150 mm x 60 mm x 1000 mm).
- 3) Uma representação dos pontos de referência de tal forma que a área da superfície que é contactada pela sonda do protótipo tem de estar contida num quadrado com 0,5 mm de lado.

II.1.3 Conceito inicial

Numa análise primária, seguindo a secção anterior, considera-se ideal que a estrutura de calibração permita o posicionamento de cada ponto tridimensional por um elemento. Assim sendo surge a questão: “É possível construir uma estrutura tridimensional e com pontos bem definidos?”

Seguindo a análise anterior, a resposta é afirmativa, mas considerando o investimento necessário pondera-se se esta opção é a mais adequada. Esta opção implica a existência uma estrutura por blocos ou com uma forma curvilínea. Alternativamente, opta-se então por considerar a criação de uma estrutura diferente, centrada em medições bidimensionais. Numa primeira parte medem-se duas das coordenadas (X, Z) sendo constante a terceira (Y) e numa segunda parte a coordenada constante é medida em conjunto com uma das outras coordenadas (Y, Z) e a restante seria a constante (X).

É necessário considerar também a posição da estrutura de calibração em relação ao protótipo. Durante a medição as pessoas avaliadas encontram-se na plataforma do protótipo. Se a estrutura de calibração estiver apoiada na plataforma do protótipo aproximaria mais a simulação (validação) a uma situação real de utilização do protótipo. Por outro lado, se a estrutura estiver apoiada no solo, em torno da plataforma do protótipo, existem menos limitações na concepção da mesma.

II.1.4 Análise dos conceitos

O posicionamento de cada ponto de referência na estrutura de calibração pode ser feito numa perspectiva tridimensional ou bidimensional. A primeira opção é exigente tecnicamente, porque é necessário garantir a fidedignidade da posição dos pontos de referência e a capacidade de representar todos os pontos de referência. Ou seja, estas opções, tipicamente resultam num maior investimento ou na diminuição da exactidão da marcação dos pontos. Na segunda opção, as medições são feitas em dois planos (XOZ e YOZ) independentes, permitindo o desenvolvimentos de um conceito mais simples e o recurso a materiais disponíveis mais facilmente no mercado. Logo, opta-se pela segunda opção, com o posicionamento bidimensional duplo.

Na posição relativa entre a estrutura de calibração e o protótipo, considera-se que se a estrutura de calibração estiver apoiada no solo, a medição pode ser feita ao mesmo nível que na outra opção. Assim sendo, optou-se pela primeira sugestão (estrutura de calibração apoiada no solo), tendo em atenção que os apoios da estrutura de calibração não deveriam estar muito longe dos apoios do protótipo.

Assim sendo, o conceito definido para a estrutura de calibração é que esta tem dois planos perpendiculares entre si e ainda relativamente ao solo. Para além disso, ela está no solo, mas sobre a plataforma do protótipo.

II.1.5 Desenvolvimento do conceito

Ao optar-se por uma aquisição bidimensional dupla, é necessário conceber a estrutura de calibração de forma a incluir ambos os planos. Define-se então quais os seus requisitos. É necessário garantir que:

1) Seja possível marcar, na estrutura de calibração, qualquer ponto dentro do espectro de medição do protótipo, ou seja $X = [0, 150]$ mm; $Y = [-30; 30]$ mm; $Z = [800; 1800]$ mm (a partir da superfície superior da plataforma do protótipo);

2) A escala onde será efectuada a marcação deve ter uma resolução, na sua graduação, pelo menos metade da desejada para o protótipo (± 1 milímetro). Como os valores a partir de 10^{-4} mm (ou décima de milímetro) começam a ser imperceptíveis ao olho humano e, para além disso, a marcação de um ponto dificilmente é menor que meio milímetro, considera-se plausível pressupor um círculo com 0,5 mm de diâmetro, ou seja $\pm 0,25$ mm;

3) O ponto de contacto entre a estrutura de calibração e o protótipo deve procurar simular o tipo contacto que irá existir entre o protótipo e o examinado.

Para evitar um aumento de complexidade, procuraram-se soluções que consigam ter ambos os planos na mesma estrutura, mantendo a perpendicularidade entre si.

Surtem então duas alternativas para a posição relativa dos planos (vista de cima):

1) Os planos estão em forma de canto visto de cima (Γ);

2) Os planos estão em forma de T visto de cima.

Na opção 1), a estrutura de calibração permite a aquisição em ambos os planos sem haver alteração da posição desta relativamente ao protótipo. No entanto, é impossível garantir que a estrutura de calibração possa representar todos os pontos dentro do espectro de medição do protótipo, pois se se centrar os pontos num dos planos, no outro plano ficariam numa das extremidades na escala (devido à sua forma em Γ). Na segunda opção, esse problema seria ultrapassado, pois as aquisições em cada plano seriam diferentes. No entanto, a passagem para as aquisições no segundo plano implica uma rotação de 180° da estrutura de calibração relativamente ao protótipo. Para esta hipótese ser viável é necessário medir algumas distâncias, entre o protótipo e a estrutura de calibração, em pontos definidos de forma a poder-se fazer uma localização relativa entre ambos. Como só a segunda opção é que respeita os requisitos, escolhe-se a forma T (vista de cima).

É necessário uma área útil de medição de 60 mm x 1000 mm para o plano YOZ e de 150mm x 1000mm para o plano XOZ.

II.1.5.1 Escala

A escala necessária é representada por quadrículas com comprimento dos seus lados igual à resolução desejada, visto serem representações com graduação em ambas as dimensões variáveis de cada plano. A sua aplicação na estrutura de calibração pode ser feita de duas formas:

- 1) Gravação directamente na superfície que representasse cada um dos planos ou pela
- 2) Fixação de uma escala comercializada.

A opção 1) exige a construção uma escala com resolução máxima de 1 mm em duas áreas de 1000 mm x 60 mm e 1000mm x 150mm (60 000 quadrículas + 150 000 quadrículas), através de ferramentas e processos complexos e dispendiosos. Na opção 2) é necessário pesquisar quais as escalas comerciais disponíveis e como é que estas podem ser fixas na estrutura de calibração. Como a escala necessária para a estrutura de calibração tem de ter, no máximo uma resolução de 1mm, considera-se que pode haver condições de seguir a opção 2), visto haver papel quadriculado com uma resolução de 1 mm²: papel milimétrico. Esta escala em papel pode ser fixa à estrutura, por colagem. Então considera-se o papel milimétrico a melhor opção. Para a fixação e suporte das folhas e posterior marcação dos pontos opta-se pela utilização de madeira, nomeadamente placas de madeira de contraplacado. Assim sendo, a estrutura não fica tão pesada (comparativamente com a utilização de outros materiais), a colagem das folhas de papel milimétrico é relativamente fácil e a fixação da marcação pode ser com uma extremidade pontiaguda inserida na madeira (como por exemplo um alfinete “push-in”).

Os pontos lidos pelo protótipo estarão marcados na superfície da pele ao longo da coluna vertebral. A pele humana não é uma superfície rígida e estática. A estrutura de calibração procura ser uma simulação dos pontos marcados. Logo, deverá levar em consideração que está a representar pontos marcados numa superfície flexível e dinâmica (pele humana). No entanto, nesta fase de concepção do protótipo, considera-se mais importante analisar a capacidade de medição de pontos bem definidos, pois no final será necessário determinar se esta capacidade responde às exigências do objectivo e só depois ponderar a relevância de se ter em consideração as características da pele humana. Assim sendo, os pontos têm de ser representados numa superfície rígida e de forma bem definida, permitindo que apenas a extremidade arredondada com diâmetro máximo de 1 mm (sonda) contacte o ponto representado. É agora necessário analisar cada plano individualmente. No plano YOZ, a coordenada X (profundidade) é constante e a marcação dos pontos pode ser feita e medida directamente no papel milimétrico, pois o contacto é estabelecido entre o ponto marcado na

folha de papel e a extremidade arredondada da sonda. No plano XOZ, a coordenada Y (desvio lateral) é constante. Contudo, o contacto não poderá ser feito com o papel pois este vai estar paralelo à régua do protótipo. Assim sendo, é necessário adicionar um elemento perpendicular a ambos, fixo ao papel milimétrico e com uma extremidade de contacto com o diâmetro máximo de 1 mm. Opta-se por se usar alfinetes “push-in”, pois estes são facilmente fixos ao papel milimétrico através da penetração da sua extremidade pontiaguda na madeira. Para criar uma extremidade de contacto nos alfinetes, usa-se como referência uma linha bem definida originária do molde em que estes foram fabricados. Por esmerilagem, uma das extremidades da topo do alfinete é desgastada, em torno dessa linha até a atingir um diâmetro menor que 1 mm. Assim sendo, a sonda contacta a extremidade moldada no topo de cada alfinete. O ponto marcado no papel milimétrico é a referência para a inserção da extremidade pontiaguda de fixação do alfinete. Torna-se necessário registar a posição relativa de diferentes pontos dos alfinetes, de forma a poder-se definir melhor a diferença entre a posição marcada no papel e a posição que o alfinete representa.

II.1.5.2 Marcação dos pontos

Falta então definir mais especificamente as dimensões do papel milimétrico e da madeira.

Para a escala cobrir a área útil de medição, o papel tem de ter um comprimento de 1000 mm. Esta dimensão em papel, nos formatos padrão comerciais, só é possível em rolo ou em formato A0. Não foi possível encontrar nenhuma das opções. Só estava disponibilizado em folhas no formato aproximado de A4 e com uma área útil de 300 mm x 200 mm. Então a alternativa foi acoplar um conjunto de 4 folhas em altura. Para garantir a continuidade da escala entre folhas, optou-se por sobrepor 50 mm de uma folha sobre a anterior e nos cantos da folha que ficar por cima, fizeram-se cortes com um ângulo de 45º de forma a ajustar uma folha à outra. Como a última folha não tem nenhuma sobreposta, a área útil de medição será de (250+250+250+300) mm x 200 mm, ou seja, 1050 mm x 200 mm. É necessário aferir esta escala, para se aceitar a sua utilização e fazer pequenas correcções caso seja necessário.

Para as placas de madeira, opta-se pela área de 1100 mm x 200 mm para o plano YOZ e de 1100 mm x 300 mm para o plano XOZ. A fixação do papel à madeira será feita com cola de batom.

Para a estrutura de suporte optou-se usar tubos de ferro de base quadrangular 30 mm x 30 mm cortados consoante a necessidade e nalgumas ligações entre eles eram reforçados com chapa (3mm de espessura) de ferro triangular (15 mm x 15 mm). A fixação da madeira à estrutura é feita por parafusos de cabeça sextavado interior fixos a porcas rebitadas nos tubos.

A base da estrutura tem a largura interna de 640 mm, assegurando-se que fica próximo da plataforma horizontal do protótipo e tem quatro apoios no solo, ajustáveis em altura. A altura total

da estrutura sem os apoios tem de ser de 1800 mm para que as placas de madeira preencham a altura desde 700 mm até aos 1800 mm.

II.1.6 Avaliação dos conceitos desenvolvidos

A avaliação da estrutura de calibração consiste na determinação do erro de linearidade resultante de uma escala composta por um conjunto de folhas coladas: a validação da escala do papel milimétrico.

II.1.6.1 Validação da escala do papel milimétrico

Após a colagem do papel milimétrico é necessário verificar se as 4 folhas de papel milimétrico fazem, ao todo, uma escala contínua com um comprimento máximo de 1000 mm. Para tal, é usada uma régua metálica com 1000 mm de comprimento (régua de aferição). Como cada folha tem 5 colunas com um traço mais forte (de 50 mm em 50 mm), estas foram utilizadas como referência para o posicionamento da régua. Os valores medidos ao longo de cada coluna também foram em intervalos de 50 mm, porque originaria uma sequência de 20 números, sendo mais que suficientes para garantir a detecção de uma variação da escala contínua ou abrupta, a execução de uma posterior regressão linear e não ser demasiado demorada. O número de colunas medidas foi definido consoante o espectro de medição, ou seja, as 5 colunas para o plano XOZ (de 0 mm a 200 mm) e as 3 colunas centrais para o plano YOZ (de 50 mm a 150 mm, sendo a coluna central o referencial do eixo y e a variação de ± 50 mm). Em todos os casos, cada medição de cada coluna foi lida 3 vezes não consecutivas. Considerou-se que a média dessas 3 leituras seria assumida como a medição de cada caso.

Fez-se uma primeira medição para se ter uma percepção duma possível variação da escala do papel milimétrico. Notou-se que a diferença entre as escalas era de cerca de 3mm, mas que esta diferença nunca era abrupta, nem na passagem de uma folha para a outra onde haveria um risco maior de desfasamento entre as escalas. Assim sendo, considerou-se possível corrigir os valores entre as escalas através de um acerto com uma equação linear, obtida por regressão. Para tal era importante registar o desfasamento assim que fosse visível. Como ambas as escalas tinham uma resolução de 1 mm, verificou-se que era possível, repartir cada milímetro em 4 partes iguais. Por exemplo, se um traço de milímetro da régua estiver alinhado com um traço da escala, o valor decimal a considerar é 0; se estiver ligeiramente acima é 0,25, se estiver mais central é 0,5; se estiver mais próximo do traço seguinte (mas sem ser sobreposto) considera-se 0,75. Note-se que é necessário ter sempre em consideração que cada leitura será o valor central de um conjunto de possíveis valores que variam de -0,25 a +0,25 do valor central. Nas tabelas II.1 e II.2 são apresentadas as diferenças entre os valores medidos no papel milimétrico e na régua de aferição, para os planos XOZ e YOZ.

Cada linha da tabela representa uma linha horizontal do papel milimétrico e cada coluna da tabela representa uma medição (em numeração romana) de uma coluna do papel milimétrico (iniciada pela letra “C”).

Tabela II.1 – validação da escala de papel milimétrico no plano XOZ

| PLANO XOZ (todas as unidades em mm) | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| Coluna Altura | C 0 | | | C 50 | | | C 100 | | | C 150 | | | C 200 | | |
| | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| 1000 | 3,50 | 3,25 | 3,25 | 4,00 | 3,50 | 3,50 | 3,75 | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,50 |
| 950 | 3,50 | 3,25 | 3,25 | 4,00 | 3,50 | 3,50 | 3,75 | 3,25 | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,25 | 3,50 | 3,50 |
| 900 | 3,50 | 3,00 | 3,00 | 3,75 | 3,25 | 3,25 | 3,50 | 3,00 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 |
| 850 | 3,25 | 3,00 | 2,75 | 3,50 | 3,25 | 3,00 | 3,25 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,25 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| 800 | 3,25 | 2,75 | 2,50 | 3,50 | 3,00 | 2,75 | 3,00 | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 3,00 | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 2,75 |
| 750 | 3,00 | 2,50 | 2,25 | 3,25 | 2,75 | 2,50 | 2,75 | 2,50 | 2,75 | 2,50 | 2,75 | 2,50 | 2,75 | 2,75 | 2,75 |
| 700 | 3,00 | 2,25 | 2,25 | 3,00 | 2,50 | 2,25 | 2,50 | 2,25 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 |
| 650 | 2,75 | 2,25 | 2,00 | 2,75 | 2,25 | 2,00 | 2,50 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 |
| 600 | 2,50 | 2,00 | 1,75 | 2,50 | 2,25 | 1,75 | 2,25 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 |
| 550 | 2,50 | 1,75 | 1,75 | 2,25 | 2,00 | 1,75 | 2,00 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 2,00 | 2,00 |
| 500 | 2,25 | 1,50 | 1,50 | 2,00 | 1,75 | 1,50 | 1,75 | 1,75 | 1,50 | 1,50 | 1,75 | 1,50 | 1,50 | 1,75 | 1,75 |
| 450 | 2,00 | 1,25 | 1,25 | 1,75 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,25 | 1,50 | 1,50 | 1,25 | 1,25 | 1,50 | 1,50 |
| 400 | 1,75 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,00 | 1,25 | 1,25 |
| 350 | 1,50 | 1,00 | 1,00 | 1,25 | 1,25 | 1,00 | 1,00 | 1,25 | 1,00 | 1,00 | 1,25 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 300 | 1,25 | 0,75 | 0,75 | 1,00 | 1,00 | 0,75 | 0,75 | 1,00 | 1,00 | 0,75 | 1,00 | 0,75 | 0,75 | 1,00 | 0,75 |
| 250 | 1,25 | 0,50 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,50 | 0,50 | 0,75 | 0,75 | 0,50 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 |
| 200 | 1,00 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,75 | 0,75 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,75 | 0,50 |
| 150 | 0,75 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,50 | 0,25 | 0,25 | 0,50 | 0,50 | 0,25 | 0,50 | 0,25 | 0,25 | 0,50 | 0,50 |
| 100 | 0,50 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 50 | 0,25 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,25 |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tabela II.2 – Validação da escala de papel milimétrico no plano YOZ

| PLANO YOZ (todas as unidades em mm) | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| Coluna Altura | C 0 | | | C 50 | | | C 100 | | | C 150 | | | C 200 | | |
| | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| 1000 | ---- | ---- | ---- | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | ---- | ---- | ---- |
| 950 | ---- | ---- | ---- | 3,25 | 3,00 | 3,25 | 3,25 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,25 | ---- | ---- | ---- |
| 900 | ---- | ---- | ---- | 2,75 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 2,75 | 2,75 | 3,00 | ---- | ---- | ---- |
| 850 | ---- | ---- | ---- | 2,50 | 2,75 | 2,75 | 3,00 | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 2,75 | ---- | ---- | ---- |
| 800 | ---- | ---- | ---- | 2,25 | 2,50 | 2,50 | 2,75 | 2,75 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,75 | ---- | ---- | ---- |
| 750 | ---- | ---- | ---- | 2,25 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | ---- | ---- | ---- |
| 700 | ---- | ---- | ---- | 2,00 | 2,25 | 2,25 | 2,50 | 2,50 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | ---- | ---- | ---- |
| 650 | ---- | ---- | ---- | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | ---- | ---- | ---- |
| 600 | ---- | ---- | ---- | 1,75 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | ---- | ---- | ---- |
| 550 | ---- | ---- | ---- | 1,50 | 1,75 | 1,75 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 1,75 | 1,75 | 2,00 | ---- | ---- | ---- |
| 500 | ---- | ---- | ---- | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,50 | 1,75 | 1,75 | ---- | ---- | ---- |
| 450 | ---- | ---- | ---- | 1,25 | 1,50 | 1,25 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,75 | ---- | ---- | ---- |
| 400 | ---- | ---- | ---- | 1,00 | 1,25 | 1,25 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,25 | 1,25 | 1,50 | ---- | ---- | ---- |
| 350 | ---- | ---- | ---- | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | ---- | ---- | ---- |
| 300 | ---- | ---- | ---- | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | ---- | ---- | ---- |
| 250 | ---- | ---- | ---- | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | ---- | ---- | ---- |
| 200 | ---- | ---- | ---- | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | ---- | ---- | ---- |
| 150 | ---- | ---- | ---- | 0,25 | 0,50 | 0,25 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | ---- | ---- | ---- |
| 100 | ---- | ---- | ---- | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,50 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,50 | ---- | ---- | ---- |
| 50 | ---- | ---- | ---- | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,25 | 0,00 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | ---- | ---- | ---- |
| 0 | ---- | ---- | ---- | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | ---- | ---- | ---- |

Após a apresentação destes dados é possível testar a linearidade da variação e tentar definir uma equação que descreva essa mesma variação. Utilizando programa informático “Programa Statistical Package for Social Sciences 13,0 for Windows” (SPSS para Windows), inseriram-se os dados e fizeram-se os respectivos gráficos e regressão linear. Definiu-se como variável independente o conjunto de valores da escala da régua de aferição (x_{XOZ} e x_{YOZ}) e como variável dependente o conjunto das diferenças entre os valores lidos no papel milimétrico e na régua de aferição. Cada medição introduzida no gráfico é o resultado da média das 3 leituras como foi referido acima.

O gráfico da figura II.1 é relativo ao plano XOZ e o gráfico da figura II.2 é relativo ao plano YOZ. As tabelas que precedem cada gráfico são relativas às equações lineares resultantes da regressão dos

pontos marcados, indicando os parâmetros obtidos (ordenada na origem e declive da recta), o coeficiente de relação quadrado (R^2) e outros parâmetros estatísticos

Figura II.1 - Gráfico G1

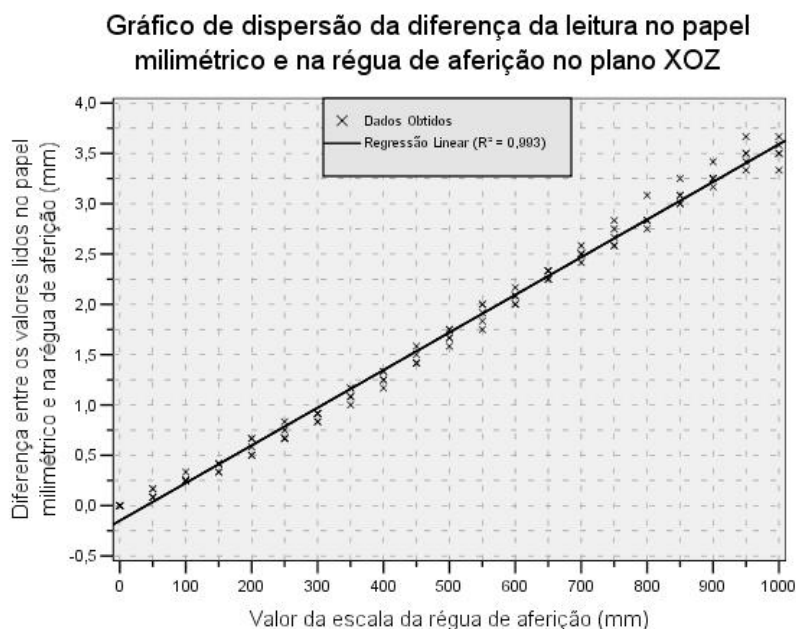
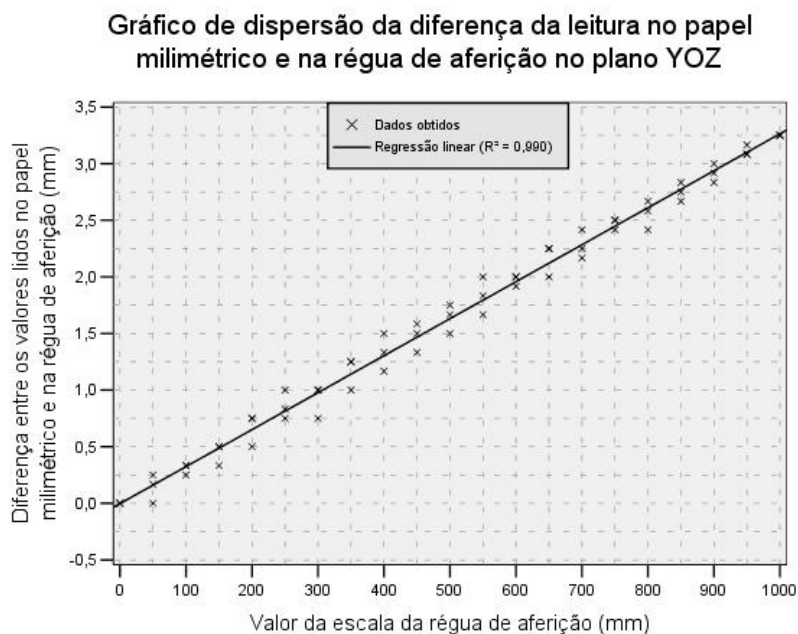


Figura II.2 - Gráfico G2



Ao analisar os dados obtidos, pode-se considerar que os modelos lineares definidos são muito aceitáveis, visto terem um $R^2 \geq 0,99$. Assim sendo as equações lineares relativas a cada um dos dois conjuntos de folhas de papel milimétrico, seguindo a equação linear $y = mx + b$, são:

$$\text{Plano XOZ: } y_{\text{XOZ}} = (3,740 \times 10^{-3}) \times \text{XOZ} + (-0,149495) \quad (\text{mm})$$

$$\text{Plano YOZ: } y_{YOZ} = (3,266 \times 10^{-3}) \times YOZ + (-2,165 \times 10^{-3}) \quad (\text{mm})$$

Em ambos os casos as unidades são em milímetros.

A correcção foi feita depois de terem sido efectuadas as medições com a estrutura de calibração, aquando da análise estatística. A tabela II.3 representa o valor de referência da coordenada Z e o respectivo valor esperado para cada um dos planos.

| Z _p | YOZ | XOZ | Z _p | YOZ | XOZ | Z _p | YOZ | XOZ |
|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|
| 666 | 668,17 | 668,34 | 488 | 489,59 | 489,68 | 299 | 299,97 | 299,97 |
| 644 | 646,1 | 646,26 | 459 | 460,5 | 460,57 | 272 | 272,89 | 272,87 |
| 627 | 629,05 | 629,2 | 426 | 427,39 | 427,44 | 238 | 238,78 | 238,74 |
| 612 | 614 | 614,14 | 403 | 404,31 | 404,36 | 207 | 207,67 | 207,62 |
| 596 | 597,94 | 598,08 | 383 | 384,25 | 384,28 | 175 | 175,57 | 175,51 |
| 579 | 580,89 | 581,02 | 363 | 364,18 | 364,21 | 148 | 148,48 | 148,4 |
| 560 | 561,85 | 561,95 | 344 | 345,12 | 345,14 | 126 | 126,41 | 126,32 |
| 543 | 544,77 | 544,88 | 321 | 322,05 | 322,05 | 111 | 111,36 | 111,27 |
| 514 | 515,68 | 515,77 | - | - | - | - | - | - |

Tabela II.3 - representa o valor de referência (VR) da coordenada Z e o respectivo valor esperado para cada um dos planos (YOZ e XOZ).

A equação de linearidade de variação da escala do papel milimétrico, determinada anteriormente para cada plano, define positivamente a qualidade do papel milimétrico enquanto escala de referência. Esta afirmação é confirmada pelo valor de R^2 ser maior que 0,99, tal como já foi referido.

II.2 Análise da posição dos alfinetes

II.2.1 Posição dos alfinetes no plano XOZ.

A aquisição de dados no plano XOZ da estrutura de calibração exige um elemento adicional – os alfinetes. É necessário avaliar metricamente a influência destes nas leituras efectuadas. É essencial ter em mente que ponto em torno do qual deve ser verificada a sua posição, é o ponto de contacto com o protótipo (régua do protótipo). Para determinar o seu posicionamento, definiram-se a extremidade anterior e a extremidade posterior de cada alfinete, sendo a primeira a próxima da régua do protótipo (e que entra em contacto com este) e segunda a mais distante desta última. Estão ligadas uma à outra por uma linha de referência (oriunda do molde no processo de fabrico) que percorre a superfície do alfinete dividindo-o simetricamente. Dividiu-se ainda o alfinete em base, corpo e topo. O ponto de contacto com a régua do protótipo situa-se na porção anterior do topo do alfinete.

Então o seu posicionamento é definido (i) pelas coordenadas X e Z das extremidades anterior e posterior da base e (ii) pela distância desde as extremidades (anterior e posterior) da face plana do topo às folhas de papel milimétrico – coordenada Y. Também é medida a distância entre o centro da face circular plana da base e o centro da face circular plana do topo. Por fim, regista-se o diâmetro de cada uma dessas faces.

O pressuposto de se conseguir uma colocação perfeita do alfinete, com a sua face circular da base totalmente assente sobre as folhas de papel milimétrico e centrado no ponto marcado com a sua linha de referência disposta paralelamente ao eixo X (na horizontal), reflecte-se de forma bem definida nas coordenadas registadas. O ponto médio entre a coordenada X de ambas as extremidades deve ser igual à coordenada X do ponto marcado no papel milimétrico. Ambas as extremidades devem apresentar o mesmo valor que a coordenada Z do ponto marcado, devido ao alinhamento horizontal da linha de referência do alfinete que intercepta todos os três. O ponto de contacto entre o alfinete e a régua do protótipo, também se encontra nessa linha e o valor da sua coordenada Z deve ser igual também. O valor da sua coordenada X encontra-se entre os valores da mesma coordenada para as duas extremidades da base, mais especificamente a $(\phi_b - \phi_t)/2$ da coordenada X da extremidade anterior. Sendo o conjunto das folhas de papel milimétrico a origem do referencial para a coordenada Y, os valores desta coordenada terão de ser iguais para ambas as extremidades do topo de cada alfinete e para as extremidades da base terão valor nulo.

O registo de todas as medições descritas acima é representado na tabela seguinte. A nomeação de cada coluna por letras, símbolos e índices permite a identificação de cada um dos pontos ou distâncias relacionados com o posicionamento dos alfinetes. Se a coluna for iniciada pelas

letras maiúsculas X, Y ou Z, então é referente à respectiva coordenada de uma extremidade. Se for pela letra maiúscula C, simboliza a distância entre os centros das faces planas circulares do topo e da base. Se for pelo símbolo (\emptyset), é referente ao comprimento de um diâmetro. O índice, representado inferior à linha, identifica se é um ponto da base ou do topo (B ou T em letra maiúscula), se é relativo a uma extremidade anterior ou posterior (a ou p em letra minúscula) e se representa a comparação com os valores esperados segundo o pressuposto explicado no parágrafo anterior (letra grega delta Δ). Ao analisar-se a tabela II.3, comprova-se que o pressuposto referido nos parágrafos anteriores não é verificado. Então é necessário tentar compreender como é o que os alfinetes ficaram colocados, a partir dos valores acima apresentados. Há três hipóteses que não se excluem mutuamente: ou o espigão não perfurou as folhas de papel milimétrico no ponto marcado descentrando a base do alfinete relativamente ao ponto, ou o espigão perfurou a tábua num ângulo não perpendicular às folhas de papel milimétrico impedindo que a face circular plana da base assentasse totalmente nas folhas de papel milimétrico, ou a linha de referência do alfinete não estava correctamente alinhada com o eixo X alterando a posição prevista para o ponto de contacto do alfinete. Há um pressuposto associado a estas hipóteses, considerado como requisito obrigatório para a aprovação da fixação de cada alfinete: o seu espigão tem de ser introduzido até ao fim, parando apenas quando a base do alfinete entrar em contacto com as folhas de papel milimétrico.

É então necessário decodificar os dados obtidos tendo em conta as três hipóteses acima referidas. Três pressupostos geométricos foram assumidos, nesta análise, relativamente às faces circular plana da base e do topo: a) estão perfeitamente paralelas uma à outra, b) ambas vão ser consideradas como perfeitamente circulares (os seus centros estão à mesma distância de cada extremidade dessa face e c) os centros dessas mesmas faces estão contidos numa linha perpendicular a ambas. O valor da coordenada X, para as duas extremidades da base, é medido a partir da escala das folhas de papel milimétrico (resolução 0,5 mm). A distância entre ambas é de 10 mm em todos alfinetes com uma incerteza associada de $\pm 0,5$ mm, podendo os valores estar dentro do intervalo de valores [9,5; 10,5] mm. O diâmetro da face circular plana da base para todos os alfinetes pode ser definido pelo intervalo de valores [9,61; 9,95] mm, o qual está contido no outro intervalo. Logo, a partir destes dados não se pode afirmar que o pressuposto da base do alfinete estar totalmente assente sobre as folhas de papel milimétrico tenha sido desrespeitado. No entanto, ao comparar-se o valor central entre as duas extremidades, ainda para a coordenada X, com o ponto marcado, há uma diferença de 0,5mm em 6 alfinetes. Assim sendo, nesses casos o alfinete está descentrado do seu ponto de marcação relativamente ao eixo X. A distância registada desde as folhas de papel milimétrico até cada uma das extremidades anterior e posterior do topo (coordenada Y), segundo os pressupostos, seriam iguais mas tal não se verifica em nenhum alfinete.

Tabela II.3 – Medições da posição dos alfinetes

| Vértebras | X _R | X _{Ba} | X _{Bp} | X _A | Y _{Ta} | Y _{Tp} | Y _A | C _{T-B} | Z _R | Z _{Ba} | Z _{Bp} | Z _{Aa} | Z _{Ap} | Ø B | Ø T |
|-----------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|------|
| C1 | 116 | 111 | 121 | 0 | 12,30 | 12,13 | 12,22 | 12,11 | 666 | 666 | 666 | 0 | 0 | 9,75 | 7,30 |
| C2 | 104 | 99 | 109 | 0 | 12,37 | 12,29 | 12,33 | 12,18 | 644 | 644,5 | 644 | -0,5 | 0 | 9,95 | 7,30 |
| C3 | 99 | 94 | 104 | 0 | 12,14 | 12,23 | 12,19 | 12,20 | 627 | 627 | 627 | 0 | 0 | 9,78 | 7,30 |
| C4 | 98 | 93 | 103 | 0 | 12,45 | 12,40 | 12,43 | 12,28 | 612 | 612 | 612 | 0 | 0 | 9,80 | 7,24 |
| C5 | 90 | 85,5 | 95,5 | -0,5 | 12,34 | 12,33 | 12,34 | 12,20 | 596 | 596,5 | 596 | -0,5 | 0 | 9,80 | 7,32 |
| C6 | 72 | 67 | 77 | 0 | 12,39 | 12,20 | 12,30 | 12,18 | 579 | 579 | 579 | 0 | 0 | 9,61 | 7,09 |
| C7 | 63 | 58,5 | 68,5 | -0,5 | 12,02 | 12,20 | 12,11 | 12,13 | 560 | 560,5 | 560,5 | -0,5 | -0,5 | 9,75 | 7,25 |
| T1 | 54 | 49 | 59 | 0 | 12,32 | 12,23 | 12,28 | 12,15 | 543 | 543 | 543 | 0 | 0 | 9,80 | 7,36 |
| T2 | 47 | 42 | 52 | 0 | 12,10 | 12,19 | 12,15 | 12,22 | 514 | 514 | 514 | 0 | 0 | 9,81 | 7,30 |
| T3 | 40 | 35 | 35 | 0 | 12,06 | 12,04 | 12,05 | 12,03 | 488 | 488 | 488 | 0 | 0 | 9,80 | 7,32 |
| T4 | 37 | 32 | 42 | 0 | 12,01 | 12,08 | 12,05 | 12,20 | 459 | 459 | 459 | 0 | 0 | 9,81 | 7,30 |
| T5 | 35 | 29,5 | 39,5 | 0,5 | 12,56 | 12,15 | 12,36 | 12,24 | 426 | 426 | 426 | 0 | 0 | 9,90 | 7,46 |
| T6 | 32 | 27 | 37 | 0 | 12,38 | 12,41 | 12,40 | 12,15 | 403 | 403 | 403 | 0 | 0 | 9,80 | 7,30 |
| T7 | 30 | 25 | 35 | 0 | 12,45 | 12,22 | 12,34 | 12,20 | 383 | 383 | 383 | 0 | 0 | 9,75 | 7,40 |
| T8 | 30 | 24,5 | 34,5 | 0,5 | 12,55 | 12,32 | 12,44 | 12,13 | 363 | 363 | 363 | 0 | 0 | 9,81 | 7,45 |
| T9 | 30 | 25 | 35 | 0 | 12,07 | 12,18 | 12,13 | 12,01 | 344 | 344 | 345 | 0 | 0 | 9,65 | 7,30 |
| T10 | 34 | 29 | 39 | 0 | 12,17 | 12,49 | 12,33 | 12,18 | 321 | 321 | 321 | 0 | 0 | 9,70 | 7,25 |
| T11 | 39 | 33,5 | 43,5 | 0,5 | 12,13 | 12,09 | 12,11 | 12,10 | 299 | 299 | 299 | 0 | 0 | 9,90 | 7,25 |
| T12 | 39 | 33,5 | 43,5 | 0,5 | 12,40 | 12,48 | 12,44 | 12,14 | 272 | 272 | 272 | 0 | 0 | 9,79 | 7,55 |
| L1 | 40 | 35 | 45 | 0 | 12,24 | 12,34 | 12,29 | 12,17 | 238 | 238 | 238 | 0 | 0 | 9,70 | 7,40 |
| L2 | 38 | 33 | 43 | 0 | 12,36 | 12,33 | 12,35 | 12,20 | 207 | 207 | 207 | 0 | 0 | 9,78 | 7,30 |
| L3 | 40 | 45 | 55 | 0 | 12,33 | 12,23 | 12,28 | 12,24 | 175 | 175,5 | 175 | -0,5 | 0 | 9,90 | 7,20 |
| L4 | 38 | 33 | 43 | 0 | 12,45 | 12,14 | 12,30 | 12,18 | 148 | 148 | 148 | 0 | 0 | 9,81 | 7,27 |
| L5 | 32 | 27 | 37 | 0 | 12,00 | 12,24 | 12,12 | 12,13 | 126 | 126,5 | 127 | -0,5 | -1 | 9,70 | 7,50 |
| S1 | 33 | 28 | 38 | 0 | 12,50 | 12,50 | 12,50 | 12,12 | 111 | 111 | 111 | 0 | 0 | 9,90 | 7,28 |

Isso implica que o espigão foi inserido com um ângulo não perpendicular às folhas de papel milimétrico, ficando apenas um ponto da circunferência da face circular plana da base em contacto com as folhas de papel. Note-se que este ângulo não poderá ser muito elevado, devido ao requisito de aprovação da fixação de cada alfinete. Assim sendo, este factor influencia ambas as coordenadas Y e X. Não se consegue avaliar a influência desse ângulo relativamente à coordenada Z porque não foram registados os valores desde as extremidades superior e inferior do topo do alfinete até às folhas de papel milimétrico. No momento das medições não se considerou relevante recolher esses dados, pois a sua influência não seria tão significativa, visto o valor da coordenada Z do ponto de contacto do alfinete ser igual à do centro do face circular plana do seu topo e só com uma diferença significativa na altura de cada extremidade (superior e inferior) é que este efeito seria significativo. No entanto, pode-se analisar a igualdade entre as coordenadas Z de ambas as extremidades anterior e posterior. Como foram verificadas diferenças em alguns casos, esse

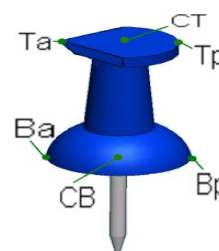


Figura II.3– Alfinete

pressuposto também foi desrespeitado nesses alfinetes.

Para todos os casos em que os pressupostos foram desrespeitados, é necessário fazer uma correcção. Na tabela seguinte são apresentadas as alterações relativamente a cada coordenada para o ponto de contacto da estrutura de calibração. Na próxima secção, é demonstrado como é que essas correcções foram determinadas.

II.2.2 Demonstração dos cálculos associados à correcção de cada coordenada do ponto de contacto de cada alfinete com o protótipo.

Relativamente à coordenada Z do ponto de contacto, a correcção associada a esta coordenada é obtido a partir da diferença entre a coordenada de cada ponto marcado e a posição do ponto de contacto Z_{PC} , ou seja, $\Delta Z = Z_{PC} - Z_p$. O valor de Z_{PC} , não é conhecido directamente, mas sabendo que este se encontra entre os valores da coordenada Z de ambas as extremidades anterior (Z_{Ba}) e posterior (Z_{Bp}) da base de cada alfinete, é possível definir Z_{PC} em função de Z_{Ba} . Sendo $Z_{Ba} = 0$ e $Z_{Bp} = \emptyset B$, a coordenada Z do ponto de contacto encontra-se em $Z_{PC} = (\emptyset B - \emptyset T)/(2)$. Essa posição normalizada ao longo do intervalo $[Z_{Ba}, Z_{Bp}] = [0, \emptyset B]$, ou seja, dividindo pelo comprimento máximo do dito intervalo, será $[(\emptyset B - \emptyset T)/(2)]/\emptyset B = [(\emptyset B - \emptyset T)/(2 * \emptyset B)]$. Definindo Z_{PC} em função de Z_{Ba} : $Z_{PC} = Z_{Ba} + [(\emptyset B - \emptyset T)/(2 * \emptyset B)] * (Z_{Bp} - Z_{Ba})$ e substituindo-o em $\Delta Z = Z_{PC} - Z_p$, obtém-se $\Delta Z = Z_{Ba} - Z_p + [(\emptyset B - \emptyset T)/(2 * \emptyset B)] * (Z_{Bp} - Z_{Ba})$.

Relativamente à coordenada X do ponto de contacto há duas variações distintas, resultantes do alfinete estar descentrado e do seu espigão não estar perfeitamente perpendicular às folhas de papel milimétrico (criando um ângulo).

Relativamente à primeira variação, é necessário adicionar a diferença entre o valor da coordenada X do ponto marcado nas folhas de papel milimétrico e o valor central entre as duas extremidades anterior e posterior. A outra variação vai ser explicada simultaneamente com a variação para a coordenada Y, pois ambas dependem dos mesmos dados recolhidos.

Assim sendo, para a coordenada Y do ponto de contacto, a sua variação é resultante do ângulo (α) referido para a coordenada X. Este ângulo é determinado a partir da diferença da coordenada Y de ambas as extremidades. Aplicando o conceito trigonométrico da função seno, $\text{sen}\alpha = \frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T}$ é determinado o valor do ângulo α que é igual ao ângulo formado entre a face circular plana da base e as folhas de papel milimétrico, pois as faces circular planas da base e do topo são paralelas

Sabendo a inclinação da base e utilizando, como centro de rotação, uma das extremidades (anterior ou posterior) da base, pode-se determinar a variação das coordenadas X e Y da posição do ponto de contacto do alfinete com o protótipo. Fala-se em rotação, porque, na tentativa de

compreensão do que aconteceu para os pressupostos terem sido desrespeitados, considerou-se que foi formado um ângulo não recto (diferente de 90º) entre o espigão (eixo central do alfinete) e as folhas de papel milimétrico que impediu que estas tivessem totalmente assentes sobre si, a face circular plana da base. Alternativamente, só um ponto do bordo (circunferência) da face circular plana é que ficou apoiado nelas, como se o alfinete tivesse rodado, em torno desse ponto, um ângulo α relativamente à posição pressuposta (definida teoricamente). Assim sendo e considerando esse ponto como o centro e o referencial, definiram-se as coordenadas (X, Y) do ponto de contacto que foram necessariamente alteradas devido à rotação $\langle (x_i, y_i) \rangle \rightarrow (x_f, y_f)$, no entanto, a distância de cada ponto ao centro (r) manteve-se constante. Partindo daí e da definição de circunferência $x_i^2 + y_i^2 = r^2$ e $x_f^2 + y_f^2 = r^2$, logo $x_i^2 + y_i^2 = x_f^2 + y_f^2$. Foram analisados dois casos distintos, pois cada um está relacionado com um centro de rotação diferente, resultante da coordenada Y da extremidade anterior da face circular plana do topo ser maior ou menor que a mesma coordenada para respectiva extremidade posterior. Se forem iguais, então não se pode admitir que o dito pressuposto foi desrespeitado.

Começando pelo caso em que a extremidade anterior tem um valor maior que a posterior, relativamente à coordenada Y. Nesta situação, o centro de rotação será a extremidade posterior da face circular plana da base do alfinete. Apresentando os dados já conhecidos, o valor de x_i é dado por $(\emptyset B + \emptyset T)/2$ e o valor de y_f é dado pelo valor da coordenada Y da extremidade anterior da face circular plana do topo, subtraindo o produto de 0,5 mm com o co-seno de α , pois o ponto de contacto está centrado a 0,5 milímetros da extremidade anterior da face circular plana do topo e como esta coordenada é referente à posição após rotação, tem de se ter em consideração o ângulo α . É necessário determinar as variáveis y_i e x_f , o qual será feito a partir das suas posições relativamente ao referencial (extremidade posterior da face circular plana da base). Como foi referido acima, o movimento do alfinete resulta duma rotação em torno do referencial, logo o segmento de recta definido entre referencial ao ponto de contacto do alfinete forma um ângulo, denominado por ângulo β , com as folhas de papel milimétrico e a variação desse ângulo resultante da rotação da posição inicial para a posição final tem o valor α . Logo o ângulo total da posição final terá o valor $\alpha + \beta$. Com estes conceitos podem-se definir as seguintes equações:

$$\text{sen}\beta = \frac{y_i}{r}$$

$$\cos\beta = \frac{x_i}{r} \quad \text{sen}(\alpha + \beta) = \frac{y_f}{r} \quad \cos(\alpha + \beta) = \frac{x_f}{r}$$

Rearranjando as equações

$$r = \frac{y_i}{\text{sen}\beta} \quad r = \frac{y_f}{\text{sen}(\alpha + \beta)} \Leftrightarrow r = \frac{y_f}{\text{sen}\alpha \cdot \cos\beta + \text{sen}\beta \cdot \cos\alpha}$$

E igualando-as tendo em conta que $\frac{\cos\beta}{\sin\beta} = \frac{\frac{x_i}{r}}{\frac{y_i}{r}} = \frac{x_i}{y_i}$; $x_i = \frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}$; $\sin\alpha = \frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T}$;

$$\cos\alpha = \sqrt{1 - \sin^2\alpha} \quad y_f = Y_{Ta}$$

$$\begin{aligned} \frac{y_i}{\sin\beta} &= \frac{y_f}{\sin\alpha \cdot \cos\beta + \sin\beta \cdot \cos\alpha} \Leftrightarrow y_i = \frac{y_f \cdot \sin\beta}{\sin\alpha \cdot \cos\beta + \sin\beta \cdot \cos\alpha} \Leftrightarrow y_i = \frac{y_f}{\sin\alpha \cdot \frac{\cos\beta}{\sin\beta} + \sin\beta \cdot \cos\alpha} \Leftrightarrow y_i = \frac{y_f}{\sin\alpha \cdot \cot\beta + \cos\alpha} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow y_i &= \frac{y_f}{\sin\alpha \cdot \frac{x_i}{y_i} + \cos\alpha} \Leftrightarrow y_i \cdot (\sin\alpha \cdot \frac{x_i}{y_i} + \cos\alpha) = y_f \Leftrightarrow \sin\alpha \cdot x_i + y_i \cdot \cos\alpha = y_f \Leftrightarrow y_i = \frac{y_f - \sin\alpha \cdot x_i}{\cos\alpha} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow y_i &= \frac{y_f - \sin\alpha \cdot \frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}}{\cos\alpha} \Leftrightarrow y_i = \frac{Y_{Ta} - \frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T} \times \frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T}\right)^2}} \end{aligned}$$

Conhecendo x_i , y_i , y_f e usando a equação acima apresentada $x_i^2 + y_i^2 = x_f^2 + y_f^2$, é possível determinar x_f .

$$x_i = \frac{\emptyset B + \emptyset T}{2} ; y_i = \frac{Y_{Ta} - \frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T} \times \frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T}\right)^2}} ; y_f = Y_{Ta}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}\right)^2 + \left(\frac{Y_{Ta} - \frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T} \times \frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T}\right)^2}}\right)^2 &= x_f^2 + Y_{Ta}^2 \Leftrightarrow x_f^2 = \left(\frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}\right)^2 + \frac{\left(Y_{Ta} - \frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T} \times \frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}\right)^2}{1 - \left(\frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T}\right)^2} - Y_{Ta}^2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow x_f &= \sqrt{\left(\frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}\right)^2 + \frac{\left(Y_{Ta} - \frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T} \times \frac{\emptyset B + \emptyset T}{2}\right)^2}{1 - \left(\frac{Y_{Ta} - Y_{Tb}}{\emptyset T}\right)^2}} - Y_{Ta} \end{aligned}$$

Depois destas quatro variáveis estarem determinadas pode-se analisar a variação de posição do ponto de contacto do alfinete. $\Delta x = x_f - x_i$ $\Delta y = y_f - y_i$

II.3 Alinhamento da estrutura de calibração com o protótipo do instrumento

O alinhamento é feito com a correcção em diferentes pontos. Antes de se iniciar esse processo, ajustam-se os apoios da estrutura de calibração, colocando-a à mesma altura nesses pontos e o mais próximo possível do solo. Para tal mede-se a distância desde a superfície da estrutura até ao solo em cada um dos quatro cantos e rodam-se os apoios no sentido horário ou anti-horário, para aumentar ou diminuir a altura respectivamente. A distância-alvo deve ser intermédia entre as distâncias mais alta e mais baixa da primeira medição.

II.3.1 Plano YOZ

Começando o processo, primeiro determina-se o par, de um dos pontos, correspondente a um dos vértices de uma placa do sistema de suporte. As coordenadas de cada par de pontos P_{ij} , para este plano, vai ser definida da seguinte forma: a coordenada X_{ij} corresponde ao comprimento do segmento de recta definido por cada par de pontos – considerando as folhas de papel da estrutura de calibração como origem deste eixo – e as coordenadas Y_{ij} e Z_{ij} correspondem aos valores marcados nas folhas de papel milimétrico ($P_{ij} = (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij})$), sendo os índices “i”, “j” referentes à posição relativa do ponto no plano YOZ, ou seja, se é direito (D) ou esquerdo (E) para o índice “i” e se é superior (S) ou inferior (I) para o índice “j” de acordo com o vértice do protótipo associado a esse mesmo par de pontos). Cada par de pontos (P_{ij}) é definido por dois pontos (A e B, por exemplo) e como tal, dever-se-ia ter dois pares de coordenadas (X_A, Y_A, Z_A e X_B, Y_B, Z_B) relativamente a um referencial. No entanto este par de pontos tem uma série de características oriundas da sua própria definição, como o seu alinhamento, que obriga a que tenham o mesmo valor de Y e Z e a que o valor de X seja referente à posição relativa de um ao outro ($X_{ij} = X_A - X_B$; $Y_{ij} = Y_A = Y_B$; $Z_{ij} = Z_A = Z_B$). Por uma questão de sistematização, considera-se o vértice anterior direito da placa inferior (V_{ADI}). Ajusta-se a posição da estrutura de calibração para que o ponto marcado nesta, do par de pontos P_{DI} , se encontre no canto de uma quadrícula e registam-se as três coordenadas: o comprimento do segmento de recta definido pelo par de ponto (coordenada X_{DI}) para além das coordenadas Y_{DI} e Z_{DI} nas folhas de papel milimétrico. Em segundo lugar, determinam-se e registam-se as coordenadas do par de pontos P_{EI} do outro vértice anterior inferior (esquerdo) (V_{AEI}), ajustando a estrutura de calibração até que X_{EI} seja igual a X_{DI} . A diferença entre os valores das coordenadas Y de ambos os pares de pontos já marcados na estrutura de calibração (P_{DI} e P_{EI}) deverá ser igual à largura da placa inferior, ou seja, 75 mm ($P_{DI} - P_{EI} = 75$ mm). Em terceiro lugar, vai-se determinar a posição do par de pontos P_{DS} correspondente ao ponto representado pelo vértice direito da placa superior (V_{ADS}). Mais uma vez, tem-se que verificar a igualdade entre os valores das coordenadas X dos três pares de pontos já definidos ($X_{DI} = X_{EI} = X_{DS}$). Se tal não acontecer, é porque é necessário ajustar a altura dos apoios até se conseguir a dita igualdade. Só então é que se pode marcar o ponto pretendido e

registar as respectivas coordenadas. A diferença entre os valores da coordenada Z dos pares de pontos P_{DI} e P_{DS} deverá ser de 1000 mm ($Z_{DS} - Z_{DI} = 1000$ mm). Por fim e para confirmação do alinhamento, marca-se o par de pontos (P_{ES}) associado ao vértice esquerdo da estrutura da placa superior (V_{AES}). O valor da coordenada X_{ES} deverá ser igual ao valor da coordenada respectiva dos outros pares de pontos ($X_{ES} = X_{DI} = X_{EI} = X_{DS}$), a distância ao terceiro ponto marcado deverá ser igual à largura da estrutura superior de duralumínio (75 mm), a diferença entre os valores das coordenadas Y de os dois últimos pares de pontos marcados na estrutura de calibração (P_{DS} e P_{ES}) deverá de ser igual à largura da placa superior, ou seja, 75 mm ($P_{DS} - P_{ES} = 75$ mm) e a diferença entre os valores da coordenada Z dos pares de pontos P_{EI} e P_{ES} deverá ser de 1000 mm ($Z_{ES} - Z_{EI} = 1000$ mm) distância ao segundo ponto marcado deverá ser igual à altura da régua vertical (1000 mm). Se tal não for obtido, é necessário medir as distâncias dos segmentos de recta de novo e se forem detectadas diferenças, deve-se avaliar o desvio dos valores pretendidos e se os seus valores forem significativos deve reiniciar-se todo o processo. Caso esta falha seja sistemática, é indício de que, em princípio, a estrutura de calibração poderá necessitar de um apoio de sustentação adicional ou o solo poderá estar irregular.

II.3.2 Plano XOZ

No plano XOZ, para definir o referencial de posicionamento entre as duas estruturas, considerou-se que o valor constante da coordenada Y deveria ser central (37 mm) na escala de medição desta coordenada ([7 ; 67] mm) e que o alinhamento deveria apoiar-se nas estruturas de suporte das peças de acrílico do protótipo (veios verticais ou placas do sistema de suporte) e numa das faces laterais da tábua do plano XOZ usando o paralelismo entre as faces laterais da régua de posicionamento (uma em contacto com o protótipo e outra com a estrutura de calibração). Ao longo do desenvolvimento que se segue, todas as distâncias e posicionamentos referidos serão relativos à coordenada Y. Se o ponto central da região de contacto dos alfinetes da estrutura de calibração com o protótipo sobre o valor 37 mm da escala, assumindo que estão a uma distância média de 12 mm das folhas de papel milimétrico e sabendo que a tábua de madeira tem 10 mm de espessura, então a face lateral da estrutura de calibração onde os alfinetes estão colocados (“face lateral dos alfinetes”) e a sua face oposta (“face lateral oposta”) encontram-se, respectivamente, nos valores 25 mm e 15mm, ambos da escala acima referida. As duas estruturas do protótipo referidas acima, os veios verticais e as placas do sistema de suporte, encontram-se respectivamente nos valores -4 mm (a 4 mm da origem da escala) e 13 mm, da escala acima referida. Como estas duas últimas estruturas encontram-se em posições mais à esquerda que qualquer uma das faces laterais da placa de madeira, a “face lateral dos alfinetes” terá de ser excluída. A “face lateral oposta” encontra-se a 2 mm das placas do sistema de suporte e a 19 mm dos veios verticais. Tendo em conta que a distância entre as duas faces laterais da régua de posicionamento é de 25 mm, o ponto central da região de

contacto dos alfinetes da estrutura de calibração com o protótipo ficará nos valores 60 mm e 43 mm da escala, se o alinhamento da “face lateral oposta” for, respectivamente, com as placas do sistema de suporte ou com os veios verticais. Como o valor pretendido para o ponto central da região de contacto dos alfinetes da estrutura de calibração com o protótipo era de 37 mm, optou-se por usar, os veios verticais com a régua de posicionamento e a “face lateral oposta” da estrutura de calibração como referenciais de posicionamento para o plano XOZ. O alinhamento dos veios verticais entre si não afecta o alinhamento, pois são eles que orientam as unidades de contacto que têm a escala do protótipo usada como referência. A distância entre as duas faces laterais da régua de posicionamento (25 mm) é suficiente para garantir que o paralelismo rectilíneo entre estas, essencial para um alinhamento satisfatório.

Com base na exposição do parágrafo anterior, definiu-se o procedimento para o plano XOZ. Este vai utilizar como referência os veios mais centrais – junto à superfície superior da placa inferior e à superfície inferior da placa superior – e a geometria paralelepípedica da régua de posicionamento. A régua de posicionamento vai ser disposta horizontalmente sobre as superfícies referidas acima (uma de cada vez), tendo uma das suas faces laterais simultaneamente apoiada nos dois varões. Posteriormente deve-se alinhar a “face lateral oposta” com a outra “face lateral dos alfinetes” da régua de posicionamento (oposta à face apoiada nos dois varões). O contacto da face lateral da estrutura de calibração com a “face lateral dos alfinetes” tem de ser suave, formando uma linha de contacto, sendo necessário assegurar a manutenção do posicionamento entre a régua de posicionamento e os veios verticais. Para garantir que estão tangentes uma à outra pode-se tentar colocar uma folha de papel entre ambas. A impossibilidade de execução desta tarefa em qualquer um dos pontos da linha de contacto entre as faces é indício que o alinhamento é satisfatório. Ao garantir-se o alinhamento e paralelismo entre as duas estruturas usando uma régua graduada, pode-se definir simultaneamente a posição relativa entre ambos. Será necessário utilizar apenas 2 pares de pontos (P_i e P_s), estando cada um associado a uma das extremidades inferiores (índice I) e superior (índice S) dos veios verticais. Todas as coordenadas de P_i têm de ser medidas antes de se passar às coordenadas de P_s . Estando a régua de posicionamento apoiada, segundo o procedimento, a distância medida (com a régua de posicionamento) desde a aresta anterior da placa do sistema de suporte que estiver em contacto com a régua de posicionamento até à aresta posterior da “face lateral oposta” da estrutura de calibração será definida como coordenada X do par de pontos, X_i e X_s para a placa inferior e para a placa superior respectivamente, que devem ser iguais ($X_i = X_s$). Se tal não acontecer, deve-se repetir o procedimento ou verificar a altura dos apoios da estrutura de calibração (podem não estar satisfatoriamente alinhados). E ainda deve ser marcado o ponto de contacto entre a face inferior da régua de posicionamento e a aresta posterior da “face lateral oposta”. Seguidamente deve-se prolongar esse ponto ao longo de uma linha (horizontal)

perpendicular à aresta referida anteriormente, interceptando a aresta posterior da “face lateral” e continuando ao longo desta “face lateral” até ser possível determinar a posição da coordenada Z desta linha nas folhas de papel milimétrico (na estrutura de calibração), obtendo-se assim os valores de Z_i e Z_s , sendo a diferença de valores entre estas duas coordenadas igual a 1000mm ($Z_s - Z_i = 1000$ mm). Por fim, o valor da coordenada Y deve ser verificado, apoiando-se a régua de posicionamento contra a face lateral direita de cada uma das placas do sistema de suporte, para que a sua escala graduada esteja disposta ao longo do eixo YY, medindo a distância desde cada uma dessas face até à aresta posterior da “face lateral”, Y_i e Y_s respectivamente, devendo os seus valores ser de 18 mm (note-se que se adicionar o valor do comprimento dos alfinetes (12 mm) e se se tiver em consideração o valor da escala graduada da coordenada Y na qual se encontra a face direita da placa do sistema de suporte (13 mm), a distância total é de 43 mm relativamente à escala graduada anteriormente referida, valor esse que é o ponto central onde era pretendido que a estrutura de calibração se encontrasse).

II.4 – Valores medidos dos pontos marcados na estrutura de calibração

Tabela II.4 – Valores registados nas medições 1 a 5 para o plano XOZ

| PLANO XOZ | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| Medição | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | | 5 | | |
| Vértebras | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| C1 | 32,5 | 41 | 592 | 32 | 40,5 | 591 | 32 | 41 | 591 | 32 | 41 | 591,5 | 32 | 41 | 591 |
| C2 | 44,5 | 40,5 | 567,5 | 44,5 | 40 | 567,5 | 45 | 40,5 | 567 | 44,5 | 40,5 | 567 | 44,5 | 40,5 | 568 |
| C3 | 50 | 41 | 550 | 51 | 41 | 549,5 | 50 | 40 | 549 | 50 | 40 | 550 | 50 | 40,5 | 550 |
| C4 | 53 | 41 | 535 | 52,5 | 40,5 | 534 | 52,5 | 41 | 534 | 52,5 | 41 | 535 | 52,5 | 40,5 | 535 |
| C5 | 59 | 41 | 519 | 58,5 | 41 | 519 | 58,5 | 41 | 518 | 58,5 | 41 | 518,5 | 58,5 | 41 | 518 |
| C6 | 77,5 | 41 | 501,5 | 77,5 | 41 | 501,5 | 77,5 | 41 | 501,5 | 77,5 | 41 | 501,5 | 77,5 | 41 | 502 |
| C7 | 86,5 | 40,5 | 481,5 | 86 | 40,5 | 481,5 | 86 | 40,5 | 481,5 | 86 | 40,5 | 481,5 | 86 | 40,5 | 481,5 |
| T1 | 96 | 40 | 465 | 95,5 | 40 | 464,5 | 95,5 | 40 | 464,5 | 95,5 | 40,5 | 464,5 | 95,5 | 40 | 464 |
| T2 | 103 | 41,5 | 437 | 102,5 | 41,5 | 437 | 103 | 41,5 | 437 | 102,5 | 41,5 | 437 | 102,5 | 41 | 437 |
| T3 | 110 | 40,5 | 410 | 109,5 | 40 | 410 | 110 | 40,5 | 410 | 108,5 | 40,5 | 410 | 109 | 40 | 410,5 |
| T4 | 112,5 | 41,5 | 382 | 111,5 | 40,5 | 382 | 111,5 | 41 | 381,5 | 111,5 | 41 | 382 | 112 | 41 | 382 |
| T5 | 115 | 41 | 348,5 | 114 | 40,5 | 348 | 114 | 41 | 348,5 | 114 | 41 | 349 | 114 | 40,5 | 348,5 |
| T6 | 118,5 | 41 | 326,5 | 118 | 40,5 | 327 | 119 | 41 | 326 | 118 | 41 | 326,5 | 117,5 | 40,5 | 327 |
| T7 | 121 | 41 | 306 | 120,5 | 40,5 | 306 | 121 | 41 | 305,5 | 120,5 | 41 | 306 | 120 | 40,5 | 306 |
| T8 | 120,5 | 40,5 | 286,5 | 120 | 40 | 286,5 | 121 | 40,5 | 286 | 119,5 | 40,5 | 286 | 120 | 40 | 286 |
| T9 | 120 | 40,5 | 265,5 | 120 | 41 | 265,5 | 119 | 41,5 | 265 | 119 | 41 | 265 | 119,5 | 40,5 | 265 |
| T10 | 116 | 41 | 242,5 | 116 | 42 | 243 | 116 | 42,5 | 243 | 115,5 | 43 | 243 | 116,5 | 42 | 243 |
| T11 | 112 | 42 | 222 | 112 | 42,5 | 222 | 112 | 43 | 222 | 111,5 | 42,5 | 222 | 112 | 42,5 | 222 |
| T12 | 112 | 40 | 194 | 111,5 | 40 | 195 | 112 | 40,5 | 194,5 | 111,5 | 41 | 194,5 | 111,5 | 40,5 | 195 |
| L1 | 110 | 41 | 158,5 | 110 | 41,5 | 158,5 | 111 | 42 | 159 | 110 | 42 | 159 | 110 | 41,5 | 159 |
| L2 | 113 | 41 | 128 | 113 | 41,5 | 128,5 | 113 | 41,5 | 129 | 112 | 41,5 | 128,5 | 112 | 41,5 | 129 |
| L3 | 109,5 | 40 | 97,5 | 109,5 | 41 | 97,5 | 109 | 41 | 97,5 | 109 | 41 | 97,5 | 109,5 | 40,5 | 97,5 |
| L4 | 112 | 40,5 | 69,5 | 112 | 41 | 69 | 111 | 41,5 | 69 | 111,5 | 41,5 | 69,5 | 112 | 41 | 70 |
| L5 | 117,5 | 39,5 | 47 | 118 | 40,5 | 47 | 119 | 41 | 47 | 118 | 41 | 47,5 | 118 | 40 | 47,5 |
| S1 | 118 | 40,5 | 32 | 117,5 | 41,5 | 32,5 | 118 | 42 | 32 | 117,5 | 41,5 | 32 | 118,5 | 41 | 32 |

Tabela II.5 – Valores registados nas medições 6 a 10 para o plano XOZ

| Plano XOZ | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| Medição | 6 | | | 7 | | | 8 | | | 9 | | | 10 | | |
| Vértebras | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| C1 | 32 | 41,5 | 592 | 32,5 | 41 | 592 | 32,5 | 41 | 592 | 33 | 41 | 591,5 | 33 | 41 | 592 |
| C2 | 44,5 | 40,5 | 568 | 44,5 | 40,5 | 568 | 44,5 | 40 | 568 | 44,5 | 40,5 | 568 | 44,5 | 40 | 568 |
| C3 | 50 | 40,5 | 550,5 | 50,5 | 40,5 | 550 | 51 | 41 | 550,5 | 50,5 | 41 | 551 | 50 | 41,5 | 550 |
| C4 | 52,5 | 41 | 535 | 52 | 41 | 535 | 52,5 | 41 | 535,5 | 52,5 | 40,5 | 535,5 | 52,5 | 40 | 535 |
| C5 | 58,5 | 41 | 518,5 | 58,5 | 41 | 518 | 58,5 | 41 | 518,5 | 58,5 | 40,5 | 519 | 58,5 | 41 | 518,5 |
| C6 | 77,5 | 41 | 502 | 77,5 | 41 | 501 | 77,5 | 41 | 501,5 | 77,5 | 41 | 501,5 | 77 | 41 | 501,5 |
| C7 | 86 | 40,5 | 481,5 | 86 | 40,5 | 481,5 | 86 | 40 | 482 | 86 | 40 | 482 | 86 | 40 | 481,5 |
| T1 | 95,5 | 40 | 464 | 95,5 | 40 | 464 | 95,5 | 40 | 464,5 | 95,5 | 40 | 464 | 95,5 | 40 | 464,5 |
| T2 | 103 | 41,5 | 437 | 103 | 41 | 437 | 103 | 41 | 437 | 103 | 41 | 437 | 103 | 41 | 437,5 |
| T3 | 109 | 40,5 | 410 | 108,5 | 40 | 410 | 108 | 40 | 410,5 | 108,5 | 40 | 410,5 | 109 | 40,5 | 410,5 |
| T4 | 111 | 41,5 | 382 | 112 | 40,5 | 382 | 112 | 40,5 | 382 | 111,5 | 41 | 382,5 | 112,5 | 41,5 | 382 |
| T5 | 114 | 41 | 348 | 114 | 41 | 348 | 114,5 | 40,5 | 348,5 | 114,5 | 41 | 348,5 | 114,5 | 41,5 | 348,5 |
| T6 | 118 | 40,5 | 327 | 118 | 40,5 | 327 | 118 | 40,5 | 327 | 118 | 40,5 | 327 | 118 | 41 | 327 |
| T7 | 120 | 41 | 306 | 120 | 40 | 306 | 120,5 | 40 | 306 | 120,5 | 40,5 | 306,5 | 121 | 41 | 306 |
| T8 | 120 | 40 | 286 | 120 | 40 | 286 | 120 | 40,5 | 286 | 120,5 | 40,5 | 286,5 | 121 | 41 | 286,5 |
| T9 | 119 | 40 | 265 | 119 | 40 | 265 | 119,5 | 40 | 265 | 119,5 | 40,5 | 265 | 119,5 | 41,5 | 265 |
| T10 | 116 | 42,5 | 243 | 116 | 42,5 | 243 | 116,5 | 42 | 243 | 116,5 | 42,5 | 243 | 117 | 43 | 243 |
| T11 | 112 | 42,5 | 223 | 111,5 | 42 | 222,5 | 112 | 42 | 222,5 | 112,5 | 42 | 222,5 | 112 | 42,5 | 222 |
| T12 | 112 | 40 | 195 | 111,5 | 40,5 | 195,5 | 112 | 40,5 | 195 | 112 | 40,5 | 195 | 112 | 41,5 | 195 |
| L1 | 110 | 41,5 | 159,5 | 110 | 41,5 | 159 | 110 | 42 | 159 | 110 | 41,5 | 159 | 110 | 42 | 159,5 |
| L2 | 112 | 41 | 129 | 112 | 41,5 | 129 | 112 | 41,5 | 128,5 | 112 | 41,5 | 128,5 | 112 | 42 | 129 |
| L3 | 109,5 | 40,5 | 98 | 109,5 | 41 | 98,5 | 109,5 | 40,5 | 98,5 | 109,5 | 40,5 | 98 | 110 | 41,5 | 97,5 |
| L4 | 111,5 | 41 | 69 | 111,5 | 40,5 | 69,5 | 112 | 41 | 70 | 112 | 40,5 | 70 | 112,5 | 41,5 | 70 |
| L5 | 118 | 40 | 47 | 118 | 39,5 | 47,5 | 118,5 | 40 | 47 | 118,5 | 40 | 47 | 118,5 | 41 | 47 |
| S1 | 117,5 | 41 | 32 | 117 | 41 | 32 | 117 | 40,5 | 32,5 | 117,5 | 41 | 32 | 117,5 | 42 | 32 |

Tabela II.6 – Valores registados nas medições 1 a 5 para o plano YOZ

| PLANO YOZ | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| Medição | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | | 5 | | |
| Vértebras | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| C1 | 79,0 | 12,0 | 590,0 | 78,5 | 11,0 | 590,0 | 78,5 | 11,0 | 590,0 | 79,0 | 11,5 | 589,5 | 78,5 | 12,5 | 590,0 |
| C2 | 79 | 14,5 | 566 | 78,5 | 13,5 | 566 | 79 | 13,5 | 566 | 79 | 14 | 566 | 78,5 | 13,5 | 566 |
| C3 | 79 | 18 | 549,5 | 78,5 | 17,5 | 549 | 79 | 17,5 | 549,5 | 79,5 | 18 | 549,5 | 78,5 | 17,5 | 549,5 |
| C4 | 79,5 | 22 | 534,5 | 79 | 21 | 534 | 79 | 21 | 534 | 79 | 21,5 | 534 | 79 | 21,5 | 534 |
| C5 | 79 | 25,5 | 517,5 | 78 | 25,5 | 517,5 | 78,5 | 25,5 | 518 | 79 | 25,5 | 518 | 78 | 24,5 | 518 |
| C6 | 79,5 | 29 | 501 | 78,5 | 28,5 | 501 | 79 | 28,5 | 501,5 | 79 | 29 | 500,5 | 79 | 28,5 | 501,5 |
| C7 | 79,5 | 30,5 | 480,5 | 78,5 | 30,5 | 480 | 79 | 30,5 | 480 | 79 | 31 | 480,5 | 78,5 | 30,5 | 480,5 |
| T1 | 79 | 33,5 | 463,5 | 78,5 | 32,5 | 463 | 79 | 32,5 | 463,5 | 79 | 32,5 | 463 | 79 | 32,5 | 463 |
| T2 | 79 | 35,5 | 437 | 78,5 | 34,5 | 437 | 79 | 34,5 | 437 | 79 | 35 | 437 | 78,5 | 34,5 | 437 |
| T3 | 79 | 35 | 409,5 | 78 | 34,5 | 410 | 78,5 | 34 | 410 | 78,5 | 34,5 | 410 | 78 | 34,5 | 410 |
| T4 | 79 | 39 | 380 | 78,5 | 38,5 | 380 | 78,5 | 38 | 380 | 78,5 | 38,5 | 380 | 78 | 38,5 | 381 |
| T5 | 79 | 38,5 | 348,5 | 78,5 | 37,5 | 348 | 79 | 37 | 348 | 79,5 | 37,5 | 348 | 78,5 | 38 | 348 |
| T6 | 79,5 | 39,5 | 325,5 | 79 | 38,5 | 325 | 79 | 38,5 | 325 | 79,5 | 38,5 | 325,5 | 78 | 39 | 325 |
| T7 | 79 | 40,5 | 303,5 | 78,5 | 40,5 | 304 | 78,5 | 40 | 303,5 | 79 | 41 | 304 | 78 | 41,5 | 304 |
| T8 | 79,5 | 35,5 | 285 | 78,5 | 35 | 284,5 | 79 | 34,5 | 284,5 | 79 | 35,5 | 284,5 | 78 | 35,5 | 284,5 |
| T9 | 79 | 40 | 264 | 78,5 | 38,5 | 265 | 79 | 38,5 | 265 | 79 | 39 | 264,5 | 78 | 39 | 265 |
| T10 | 79,5 | 39,5 | 242,5 | 79 | 39 | 242 | 79 | 39 | 242 | 79,5 | 39,5 | 242 | 78,5 | 39,5 | 241,5 |
| T11 | 79 | 42,5 | 222 | 79 | 42 | 222 | 79 | 41,5 | 222 | 79,5 | 41,5 | 222 | 78,5 | 42,5 | 221,5 |
| T12 | 79 | 42 | 194 | 78,5 | 41,5 | 194 | 78,5 | 41,5 | 194 | 79 | 41,5 | 194 | 78 | 42 | 194 |
| L1 | 79 | 44 | 159 | 78,5 | 43,5 | 159 | 79 | 43 | 159 | 79 | 43,5 | 159 | 78 | 43,5 | 159 |
| L2 | 79 | 48 | 129 | 78,5 | 48 | 129,5 | 78,5 | 47,5 | 129,5 | 79 | 48,5 | 129,5 | 78 | 48 | 129,5 |
| L3 | 79,5 | 48 | 98 | 78,5 | 47,5 | 98 | 79 | 47 | 98,5 | 79 | 47,5 | 98,5 | 78 | 47,5 | 98,5 |
| L4 | 79 | 50,5 | 69 | 78 | 51 | 69,5 | 78,5 | 50,5 | 69 | 79 | 50,5 | 69,5 | 77,5 | 50,5 | 69,5 |
| L5 | 79 | 54,5 | 48 | 78 | 54,5 | 48 | 78,5 | 54,5 | 47 | 79 | 54,5 | 47 | 78 | 54,5 | 47 |
| S1 | 79 | 52,5 | 32 | 79 | 53 | 32 | 79 | 53 | 31,5 | 79,5 | 53 | 31,5 | 78,5 | 53 | 31,5 |

Tabela II.7 – Valores registados nas medições 6 a 10 para o plano YOZ

| Plano YOZ | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| Medição | 6 | | | 7 | | | 8 | | | 9 | | | 10 | | |
| Vértebras | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| C1 | 78,0 | 12,0 | 590,0 | 78,5 | 12,5 | 590,0 | 78,5 | 11,5 | 590,0 | 78,5 | 11,5 | 589,5 | 78,5 | 12,0 | 589,5 |
| C2 | 78,5 | 13,5 | 567 | 78,5 | 14,5 | 566,5 | 78,5 | 13,5 | 566 | 78,5 | 13,5 | 566 | 78,5 | 14 | 566 |
| C3 | 78,5 | 17,5 | 549,5 | 78,5 | 18 | 549,5 | 78,5 | 17,5 | 549 | 78,5 | 17,5 | 549,5 | 78,5 | 18 | 549,5 |
| C4 | 79 | 21 | 534,5 | 79 | 21,5 | 534 | 79 | 21 | 534 | 79 | 21 | 534 | 79 | 21,5 | 534 |
| C5 | 78 | 24,5 | 518,5 | 78,5 | 25 | 518,5 | 78,5 | 24,5 | 518 | 78,5 | 25 | 518 | 78,5 | 25,5 | 518 |
| C6 | 78,5 | 28 | 501,5 | 78,5 | 28,5 | 501 | 78,5 | 28,5 | 501 | 78,5 | 28,5 | 501 | 78,5 | 29 | 501 |
| C7 | 78,5 | 30,5 | 480 | 78,5 | 31 | 480 | 78,5 | 30,5 | 480,5 | 78,5 | 30 | 480,5 | 78,5 | 30,5 | 480 |
| T1 | 78,5 | 32,5 | 463,5 | 79 | 32,5 | 463 | 79 | 32,5 | 464 | 78,5 | 32,5 | 463 | 79 | 33 | 463 |
| T2 | 78 | 34 | 437,5 | 78,5 | 34,5 | 437 | 78,5 | 34,5 | 437 | 78,5 | 34,5 | 437 | 78,5 | 34,5 | 437 |
| T3 | 78 | 34 | 410,5 | 78,5 | 35 | 410,5 | 78,5 | 34,5 | 410,5 | 78 | 34 | 410,5 | 78,5 | 35 | 410 |
| T4 | 78 | 37,5 | 381 | 78 | 38,5 | 380 | 78 | 38,5 | 380,5 | 78 | 38 | 380,5 | 78,5 | 39 | 380,5 |
| T5 | 78,5 | 38 | 348 | 78,5 | 38 | 348 | 78,5 | 37,5 | 348 | 78,5 | 36,5 | 348,5 | 78,5 | 37,5 | 349 |
| T6 | 78,5 | 39 | 325 | 79 | 39 | 325 | 79 | 38,5 | 325 | 79 | 38 | 325 | 79 | 39 | 326 |
| T7 | 78 | 41,5 | 304 | 78,5 | 41,5 | 304 | 78,5 | 41 | 304 | 78,5 | 40,5 | 304 | 78,5 | 41,5 | 304 |
| T8 | 78 | 35,5 | 284 | 78,5 | 35,5 | 284 | 78,5 | 35 | 284,5 | 78,5 | 35 | 284 | 78,5 | 35 | 283,5 |
| T9 | 78 | 39 | 265 | 78,5 | 39 | 265 | 78,5 | 38,5 | 264,5 | 78 | 38,5 | 264,5 | 78,5 | 39 | 264,5 |
| T10 | 78,5 | 39,5 | 242 | 79 | 40 | 242 | 79 | 39,5 | 241,5 | 78,5 | 39,5 | 242 | 78,5 | 39,5 | 241,5 |
| T11 | 78,5 | 42,5 | 221,5 | 78,5 | 42,5 | 222 | 79 | 42,5 | 221,5 | 78,5 | 42,5 | 222,5 | 79 | 42,5 | 222 |
| T12 | 78,5 | 42 | 194 | 78,5 | 42,5 | 194,5 | 78,5 | 42 | 194 | 78 | 42 | 194 | 78,5 | 42 | 195 |
| L1 | 78 | 43 | 159 | 78,5 | 44 | 159 | 78,5 | 43 | 158,5 | 78,5 | 43,5 | 158,5 | 78,5 | 43,5 | 159 |
| L2 | 78 | 48 | 129,5 | 78,5 | 48 | 130 | 78,5 | 48,5 | 129,5 | 78,5 | 48,5 | 129,5 | 78,5 | 48,5 | 129,5 |
| L3 | 78 | 48 | 98,5 | 78,5 | 48,5 | 98 | 78,5 | 47,5 | 98 | 78 | 47,5 | 98 | 78,5 | 48 | 98 |
| L4 | 77,5 | 51 | 69 | 78 | 51 | 69 | 78 | 51 | 69 | 77,5 | 51 | 69 | 78 | 51 | 69 |
| L5 | 77,5 | 54,5 | 47 | 78 | 54,5 | 47 | 78 | 54 | 47,5 | 77,5 | 54 | 47,5 | 78 | 54 | 47,5 |
| S1 | 78,5 | 53 | 31,5 | 78,5 | 53 | 31,5 | 78,5 | 52,5 | 31,5 | 78,5 | 53 | 32 | 78,5 | 52,5 | 32 |

II.4 – Procedimento para a medição dos pontos de referência

Antes de cada medição, todas as peças do protótipo são subidas e o processo é repetido como nas medições anteriores (apêndice II).

APÊNDICE III Testes e Cálculos

III.1 Ensaio relativo ao guiamento da métrica vertebral no eixo Z

O objectivo deste ensaio foi testar diferentes configurações para o conceito seleccionado relativamente ao sistema de guiamento do eixo Z, nomeadamente a utilização de furos com casquilhos e respectivos veios de base circular.

Foram adquiridos casquilhos da empresa IGUS®, para veios com:

- 10 mm de diâmetro (GSM 10 12 15). Este, depois de aplicados nos furos, apresenta uma tolerância característica entre +0,032 mm e +0,102 mm . Os requisitos técnicos em termos de folga, segundo a norma ISO 3547-1 , são h9 (de 0,000 mm a -0,036 mm) para o veio e H7 (de 0,000mm a + 0,015 mm) para o furo de encaixe do casquilho .

- 12 mm de diâmetro (WSM 12 14 15). Este, depois de aplicados nos furos, apresenta uma tolerância característica entre +0,025 mm e +0,083 mm . Os requisitos técnicos em termos de folga, segundo a norma ISO 3547-1 , são h9 (de 0,000 mm a -0,043 mm) para o veio e H7 (de 0,000mm a + 0,018 mm) para o furo de encaixe do casquilho .

Os veios de 10 e 12 mm aplicados são de aço inoxidável Ck45, com tolerância h9. O veio de 10 mm apresenta uma tolerância entre 0,000 mm e -0,036 mm e o veio de 12 mm apresenta uma tolerância entre 0,000 mm e -0,043 mm. Os furos de 12 mm foram maquinados com uma broca de 11,8 mm e depois com um mandril de 12,00 mm. Os furos de 14 mm foram maquinados com uma broca de 13,8 mm e depois com um mandril de 12,00 mm.

O prognóstico de desempenho do sistema de guiamento centra-se no número de apoios de deslizamento (número de casquilhos e veios) tendo em consideração as respectivas folgas e a do sistema de guiamento em relação ao sistema de tracção (linha primitiva da cremalheira). O número de veios aplicados e a sua disposição apresentavam diferentes possibilidades. Devido ao diâmetro dos veios e por não se conseguir executar o furo no centro da unidade de contacto (por causa da cremalheira e do sistema de suporte), considerou-se que a utilização de um veio apenas seria inviável. O número mínimo de veios seria um conjunto de dois veios alinhados ao longo de uma linha paralela ao eixo X. É privilegiado um sistema com número par de veios, pois de outra forma ter-se-ia um casquilho desemparelhado e este teria de ficar numa posição central interferindo com os outros sistemas da unidade de contacto. Assim sendo, definiram-se três possibilidades, em termos do número de veios a serem aplicados: 2, 4 ou 6 veios.

A execução dos testes exigiu a construção de uma estrutura de suporte dos veios e que encaixasse na base da métrica vertebral. É de relembrar que a aplicações de veios no sistema de

guiamento do eixo Z, foi decidida posteriormente a uma fase inicial, da qual já se tinham fabricado um conjunto de elementos dos diferentes sistemas, incluindo a base do instrumento.

A estrutura teve de ser o mais simples possível, evitando o uso desnecessário de recursos e tempo. Esta era composta por duas placas. Os veios eram fixos a cada placa utilizando parafusos que passavam por furos feitos nas placas e eram apertados em furos roscados existentes nas extremidades dos veios. O sistema de suporte que sustentava a cremalheira utilizava espigões de base quadrangular, logo, para se poder aplicar as placas na base do instrumento, cada uma destas tinha de ter mais um furo de base quadrangular pelo qual passaria o respectivo espigão.

Para a estrutura foram utilizados parafusos M6 de cabeça sextavada interna com 6 mm de diâmetro e 12 mm de comprimento na região roscada, pois apresentavam uma dimensão adequada aos veios e à placa e tinham robustez suficiente para cumprir a tarefa de fixação dos veios às placas. Entre cada parafuso e as placas e entre os veios e as placas foram utilizadas anilhas de chapa para que as cargas exercidas sobre os elementos fossem distribuídas uniformemente. As placas eram de aço com 2 mm de espessura e cada uma tinha 7 furos: seis circulares e com diâmetro de 7 mm, para a passagem do corpo do parafuso M6); outro furo, quadrangular e com 15 mm de lado, para a passagem do espigão de base quadrangular e com 14 mm de lado. A posição de cada furo ao longo das placas foi definida consoante a posição dos furos na unidade de contacto. As placas foram cortadas numa guilhotina de corte de chapa metálica a partir de uma placa de 1,5 m * 3 m e os furos foram executados por uma sonhadora CNC Euromac (modelo BX).

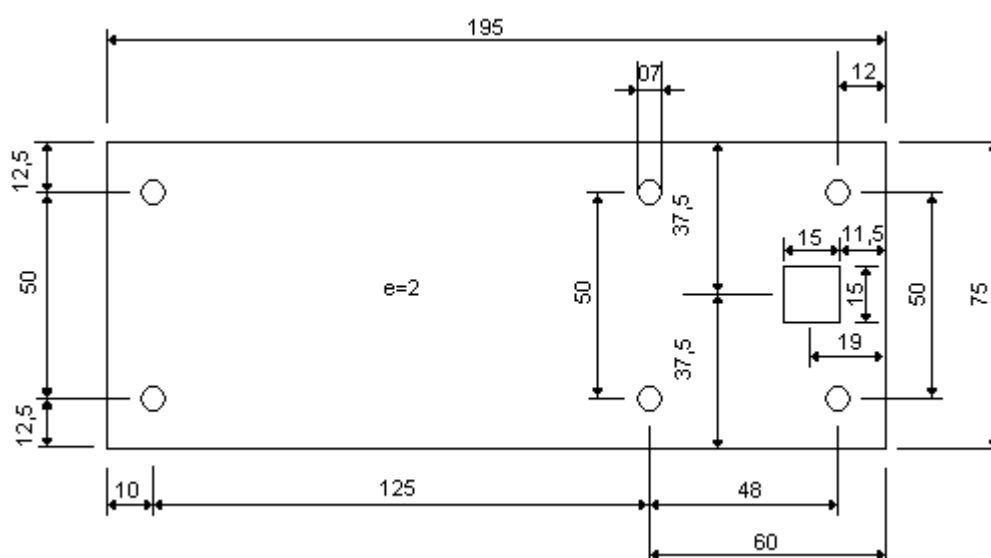


Figura III.1: representação esquemática com cotas das placas metálicas

A fixação dos veios às placas exigiu que as extremidades dos veios fossem furadas axialmente ao centro e posteriormente fossem maquinadas as roscas fêmea M6. Para tal, cada extremidade de

cada veio foi rectificada num torno. De seguida, fez-se um furo axial na extremidade com 5 mm de diâmetro e centrado para depois este ser roscado com um conjunto de três machos de roscar M6.

Após a construção da estrutura, foi necessário maquinar a unidade de contacto. Na sua extremidade lateral esquerda (mais afastada da cremalheira) foi colado um bloco de acrílico de 15 mm de altura por 20 mm de comprimento e 75 mm de largura com o objectivo de se poderem maquinar dois furos nesta extremidade da peça. Foram definidos e marcados 6 pontos que seriam o centro de cada furo. Inicialmente com uma broca de 11,8 mm e depois com um mandril de 12,00 mm executaram-se os furos. Aplicaram-se os casquilhos nos furos efectuados e executaram-se os testes. Posteriormente, os mesmos furos foram alargados com uma broca de 13,8 mm e rectificados com um mandril de 14,00 mm.

Num primeiro teste com dois casquilhos de 10 mm de diâmetro interno (GSM 10 12 15), constatou-se que a instabilidade da unidade de contacto era maior do que a esperada, devido à espessura diminuta dos veios de 10 mm. Então experimentou-se analisar o comportamento da peça de acrílico aplicando veios de 12 mm. Antes de se avançar com o alargamento dos furos para 14 mm, visto os furos terem 12 mm, foi sugerido que se testasse a unidade de contacto, a título experimental, sem casquilhos, directamente nos furos de 12 mm feitos previamente para os casquilhos com 10 mm de diâmetro. Apesar de ser boa prática utilizar casquilhos, visto que a maior parte do tempo as unidades de contacto comportam-se como peças estáticas, esta hipótese poderia ser uma alternativa. De facto, apesar da ausência de casquilhos, a oscilação era muito diminuta e a unidade de contacto deslizava satisfatoriamente, especialmente depois de se aplicar um lubrificante (WD40) no veio.

Para que as diferentes hipóteses pudessem ser testadas, os furos das placas foram numerados, de acordo com a figura.

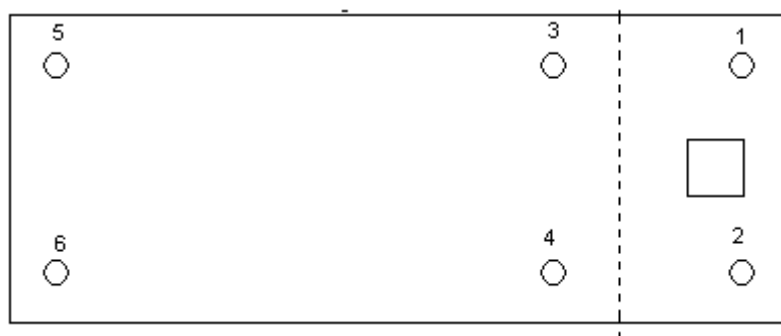


Figura III.2: Representação da posição de cada varão na placa do sistema de suporte

Foi executada a seguinte bateria de testes:

- teste 0: Antes de se iniciarem os testes com as diferentes opções, fez-se um pré-teste com os veios de 10 mm e 12 mm de diâmetro, para se avaliar até que ponto estes teriam capacidade estrutural suficiente para assegurar alguma estabilidade às unidades de contacto. Testou-se a configuração de dois veios a passar pelos furos 3 e 4 (mais próximos do sistema de guiamento) e analisou-se a estabilidade dos veios em si. Como o objectivo era analisar o comportamento dos veios os veios de 10 mm foram testados com casquilhos e os de 12 mm sem casquilhos, utilizando assim, sempre os mesmos furos de 12,00 mm.

Resultado: na opção com os veios com 10 mm de diâmetro, estes oscilavam bastante. Em contrapartida os veios com 12 mm de diâmetro apresentavam uma boa estabilidade, sugerindo que seriam suficientes para assegurar que o sistema de guiamento poderia ter um bom desempenho. Apesar dos veios com 12 mm de diâmetro terem um diâmetro 20% maior que os veios com 10 mm de diâmetro, a nível da área seccional (A_s) de cada um (relevante em termos do volume real dos veios), a diferença é maior, pois esta é calculada a partir do produto entre o quadrado do raio (r) e a constante π ($A_s = r^2 \cdot \pi$), ou seja, para o veio com 10 mm de diâmetro a área seccional é de $78,5 \text{ mm}^2$ ($A_s = r^2 \cdot \pi \Leftrightarrow A_s = (5\text{mm})^2 \cdot 3,14 \Leftrightarrow A_s = 78,50\text{mm}^2$) e para o veio com 12 mm de diâmetro a área seccional é de $113,04 \text{ mm}^2$ ($A_s = r^2 \cdot \pi \Leftrightarrow A_s = (6\text{mm})^2 \cdot 3,14 \Leftrightarrow A_s = 113,04 \text{ mm}^2$). Assim sendo, a área seccional do veio com 12 mm de diâmetro é 44% maior a área seccional do veio com 10 mm de diâmetro. Como ambos os veios têm 1000 mm de altura e o volume de um cilindro é calculado a partir do produto entre a área seccional do cilindro e a sua altura, pode-se afirmar que os veios com 12 mm de diâmetro tem um volume 44% maior que os veios com 10 mm de diâmetro. A diferença significativa de volume entre os diferentes veios é suficiente para que o comportamento do veio com 12 mm de diâmetro seja aceitável para o sistema de guiamento e o comportamento do veio com 10 mm de diâmetro já não seja satisfatório.

O desempenho do veio de 12 mm nos furos sem casquilho revelou-se melhor do que esperado. Daí ter-se colocado a hipótese de não usar os casquilhos e criar duas fases de testes: a primeira sem casquilhos tendo cada furo 12 mm de diâmetro; a segunda com casquilhos tendo cada furo o diâmetro de 14 mm.

Fase 1: furos de 12 mm sem casquilhos

- Teste 1.1: Utilização de 2 veios através dos furos 1 e 2 directamente na unidade de contacto. Nesta hipótese, o sistema de guiamento encontrava-se distante do sistema de tracção. Esperava-se que esta oscilasse significativamente e que a força aplicada pelo sistema pinhão-cremalheira não fosse suficiente para deslocar a unidade de contacto ao longo do sistema de tracção.

Resultado: a unidade de contacto deslizou, mas haviam oscilações na sua extremidade mais distante da cremalheira. O facto de ter dois apoios, apenas assegurava estabilidade na direcção de uma recta imaginária formada pelos pontos centrais dos dois furos (eixo X). Na direcção perpendicular a essa recta (eixo Y), devia existir um momento cinético maior, visto a unidade de contacto ser mais alongada nesta direcção. No entanto, nessa direcção só existia um apoio, levando a que a unidade de contacto oscilasse com relativa facilidade.

- Teste 1.2: Utilização de 2 veios através dos furos 3 e 4 directamente na unidade de contacto. Nesta hipótese, o sistema de tracção estava muito próximo do de guiamento. Esperava-se que o sistema oscilasse significativamente, mas que o sistema de tracção tivesse um bom desempenho.

Resultado: a unidade de contacto deslizou, existiam oscilações na sua extremidade mais distante da cremalheira. Este teste apresentou resultados semelhantes ao teste 1 e a sua configuração enquadrava-se na justificação apresentada para o resultado do mesmo teste, confirmando sugestão nele apresentada.

- Teste 1.3: Utilização de 2 veios através dos furos 5 e 6 directamente na unidade de contacto. Nesta hipótese, o sistema de guiamento estava muito afastado do sistema de tracção. Esperava-se que o sistema não oscilasse significativamente, pois o sistema de guiamento encontrava-se na extremidade mais distante relativamente ao sistema pinhão cremalheira. Mas a hipótese sugerida poderia apresentar um deslocamento não contínuo, pois o sistema de tracção estava muito longe do sistema de guiamento.

Resultado: a unidade de contacto bloqueou com frequência. Neste teste, os veios se encontravam-se na região da unidade de contacto que, nos dois testes anteriores, apresentava oscilações e, consequentemente, este fenómeno não se verificou. No entanto, o sistema de tracção estava a suportar parte da unidade de contacto, cumprindo funções que deveriam ser da responsabilidade do sistema de guiamento e como resultado a unidade de contacto bloqueava com frequência.

- Teste 1.4: Utilização de 4 veios através dos furos 1, 2, 3, 4 directamente na unidade de contacto. Nesta hipótese o sistema de tracção encontrava-se entre os veios. Note-se os veios estavam relativamente próximos e a reduzida tolerância dimensional dos veios poderia originar um resultado satisfatório.

Resultado: O sistema de guiamento funcionou bem e com muito pouca oscilação. O sistema de tracção encontrava-se posicionado entre os veios e em ambas as direcções do plano horizontal (XOZ) havia dois veios. Estes dois factores aumentaram as possibilidades de um bom desempenho em

termos de movimento da unidade de contacto e em termos da reduzida oscilação da unidade de contacto, respectivamente, tal como se verificou nos resultados.

- Teste 1.5: Utilização de 4 veios através dos furos 1, 2, 5, 6 directamente na unidade de contacto. Nesta hipótese o sistema de tracção na unidade de contacto encontrava-se entre os veios. No entanto, devido à reduzida tolerância dimensional dos furos e à grande distância entre os dois pares de veios (1,2 e 5,6), o sistema poderia apresentar um deslocamento não contínuo ou até mesmo bloquear.

Resultado: o bloco de acrílico que foi colado à unidade de contacto cedeu. Esta fractura não esteve relacionada com a forma como o bloco foi fixo à unidade de contacto, porque este foi testado com a aplicação de uma força vertical para verificar a solidez da colagem. Note-se que esta técnica de fixação é habitualmente utilizada na indústria dos acrílicos e, de facto a própria unidade de contacto também tinha outros blocos colados e a sua estabilidade estrutural mantinha-se. Considerou-se que a fractura aconteceu porque os furos tinham uma tolerância dimensional demasiado restrita para a distância a que os pares de furos se encontravam, levando a que a força exercida sobre a unidade de contacto para que esta se deslocasse, tivesse sido suficiente para que a fixação cedesse.

- Teste 1.6: Utilização de 4 veios através dos furos 3, 4, 5, 6 directamente na unidade de contacto. Para este teste teve que se preparar a unidade de contacto e o bloco de acrílico para que as peças fossem coladas novamente. Nesta hipótese o sistema de tracção apresentava-se externamente aos veios. Este sistema sugeria estar um pouco desequilibrado, mas havia a possibilidade que tivesse uma performance relativamente estável.

Resultado: a acção do sistema de tracção não foi satisfatória, havendo bloqueio da unidade de contacto com relativa facilidade, apesar de ter havido pouca oscilação da unidade de contacto. Apesar de neste teste também se ter utilizado 4 veios como no teste 4, o sistema de tracção estava fora do perímetro formado pelos 4 veios e, consequentemente, a unidade de contacto teve dificuldades em movimentar-se, apesar de não ter havido oscilações significativas.

- Teste 1.7: Utilização dos 6 veios através de todos os furos, directamente na unidade de contacto. Nesta hipótese havia um sistema de 6 apoios com pouca folga, o que sugeria que o sistema poderia apresentar um deslocamento não contínuo e possivelmente iria bloquear.

Resultado: a unidade de contacto não se movimentou e não houve qualquer oscilação. Neste teste confirmaram-se os resultados verificados em todos os outros testes anteriores: um número

maior de veios favorecia a estabilidade da unidade de contacto, mas podia comprometer o desempenho do sistema de tracção pois a unidade de contacto tenderia a ficar bloqueada; se o sistema de tracção estivesse fora do perímetro formado pelos veios ou distante do centro do dito perímetro, o desempenho do sistema de tracção poderia ficar comprometido.

Fase 2: furos de 14 mm com casquilhos.

Os mesmos testes foram feitos aplicando casquilhos. Alargaram-se os furos para 14,00 mm e colocaram-se os respectivos casquilhos. Destes testes esperava-se que a performance fosse melhor que os testes anteriores particularmente, naqueles em que a unidade de contacto ficou bloqueada. Logo, os resultados foram apresentados em comparação com o desempenho da configuração de cada teste da fase 1.

- Teste 2.1: Utilização de 2 veios através dos casquilhos colocados nos furos 1 e 2 da unidade de contacto.

Resultado: Comportamento semelhante ao teste 1.1.

- Teste 2.2: Utilização de 2 veios a através dos casquilhos colocados nos furos 3 e 4 da unidade de contacto.

Resultado: Comportamento semelhante ao teste 1.2.

- Teste 2.3: Utilização de 2 veios através dos casquilhos colocados nos furos 5 e 6 da unidade de contacto.

Resultado: Comportamento semelhante ao teste 1.3.

- Teste 2.4: Utilização de 4 veios através dos casquilhos colocados nos furos 1, 2, 3 e 4 da unidade de contacto.

Resultado: O sistema de guiamento funcionou relativamente bem, bloqueando por vezes. A unidade de contacto apresentou muito pouca oscilação, tal como no teste 1.4. O resultado obtido neste teste, foi inesperado, pois suponha-se que o sistema com casquilho funcionasse melhor que o sistema de guiamento sem casquilhos. No entanto tal não se verificou, sendo que a razão possível passe pela reduzida tolerância dimensional entre o veio e o casquilho.

- Teste 2.5: Utilização de 4 veios através dos casquilhos colocados nos furos 1, 2, 5 e 6 da unidade de contacto.

Resultado: a unidade de contacto movimentou-se com muita dificuldade e não apresentava qualquer oscilação. Pela mesma razão que no teste 1.5 houve fractura da unidade de contacto, neste

teste a unidade de contacto não se conseguiu movimentar porque a tolerância dimensional dos veios e dos furos era demasiado restrita tendo em conta a distância a que o par de veios 1,2 se encontrava do outro par de veios 5,6. Neste caso, não houve fractura porque não se forçou tanto a unidade de contacto a movimentar, antecipando a dita fractura caso se aplicasse mais força.

- Teste 2.6: Utilização de 4 veios através dos casquilhos colocados nos furos 3, 4, 5 e 6 da unidade de contacto.

Resultado: Comportamento semelhante ao teste 1.6.

- Teste 2.7: Utilização dos 6 veios através dos casquilhos colocados nos em todos os furos da unidade de contacto.

Resultado: Comportamento semelhante ao teste 1.7.

Os resultados apresentados são qualitativos e pouco detalhados, mas pode-se constatar que os sistemas de dois eixos, não tiveram um mau comportamento a nível de guiamento mas apresentavam oscilações significativas na unidade de contacto. Os sistemas de 4 veios, tem um comportamento mais satisfatório em termos de oscilação mas algumas vezes a unidade de contacto bloqueou. De todos os sistemas com 4 veios, a configuração que utilizava os furos 1, 2, 3 e 4 apresentou o desempenho mais satisfatório, particularmente a configuração sem casquilhos (teste 1.4). O mesmo sistema, mas com casquilhos apresentou um desempenho ligeiramente inferior visto que a unidade de contacto por vezes bloqueou.

O sistema com 6 veios revelou ser inviável, visto que a unidade de contacto ficava bloqueada e não se deslocava.

A utilização de veios com 10 de diâmetro apresentou um desempenho pouco satisfatório, comparativamente com os veios com 12 mm de diâmetro, provavelmente pela diferença de volume entre ambos, como já foi exposto anteriormente.

Após a realização de todos os testes concluiu-se que a opção que apresentou melhor desempenho foi a configuração com quatro veios com 12 mm de diâmetro dispostos nos furos 1, 2, 3 e 4 sem a utilização de casquilhos.

III.2 – A folga do sistema de guiamento do eixo Y e a medição

Demonstração de que os valores apresentados para a folga e para o comprimento e largura do nível Y da unidade de contacto permitem uma variação máxima (originada por uma possível rotação em torno de um eixo vertical) do sistema de contacto com os pontos marcados, inferior ao valor da precisão requerida para o instrumento.

A tolerância dimensional do sistema de guiamento do eixo Y, em conjunto com o comprimento e a largura do nível Y da unidade de contacto, permite uma oscilação. Esta é apresentada numa imagem sem estar à escala, simplesmente com intuito explicativo

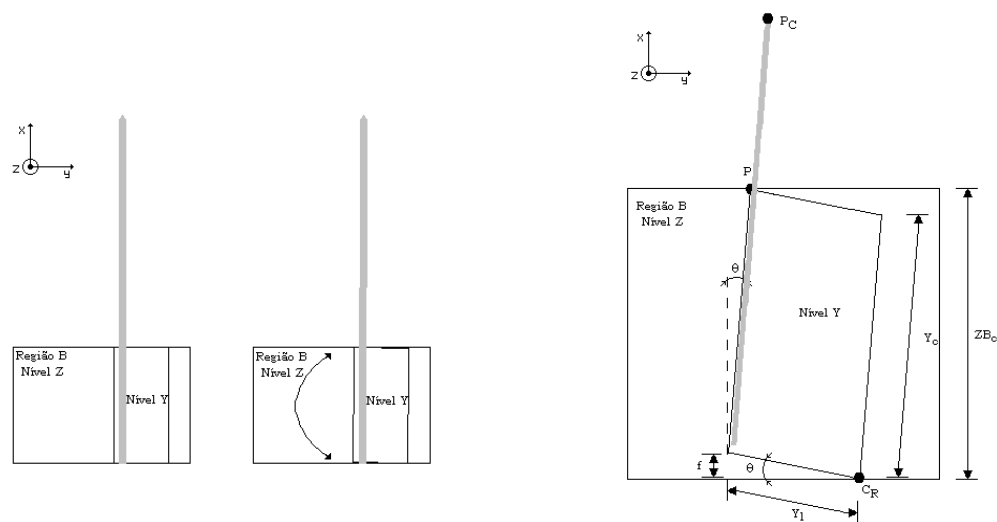


Figura III.3 a) Representação esquemática da possível rotação do nível Y no num plano horizontal (as dimensões não se encontram à escala); b) Representação esquemática da posição de rotação máxima com maior detalhe (as dimensões não se encontram à escala)

$$\text{sen}\theta \times \text{folga} + \cos\theta \times \text{comprimento}$$

Na Fig. III.3 b), o nível Y da unidade de contacto encontra-se na posição de rotação máxima, sendo o ponto C_R o ponto de rotação e P o ponto de paragem. A figura apresenta um esquema bidimensional (plano horizontal), mas num sistema tridimensional tanto o ponto C_R como o ponto P são constituídos por arestas verticais do nível Y da unidade de contacto. A possibilidade esquematizada sucede quando uma das arestas verticais se encontra numa posição tão próxima do limite da folga que fica presa num dos carris do sistema de guiamento, funcionando como eixo de rotação (ponto C_R). A rotação termina quando a aresta da região lateral oposta contacta o outro carril do sistema de guiamento (ponto P). Nesse momento, o ângulo θ é máximo e o desvio do ponto de contacto é máximo. Definindo as dimensões apresentadas, f é a folga, Y_1 a largura do nível Y

da unidade de contacto, Y_c é o comprimento do nível Y da unidade de contacto e ZB_c é a região B do nível Z da unidade de contacto. Durante a rotação o ponto CR não se move e o ponto P encontra-se sempre à mesma distância do ponto C_R . O seno do ângulo θ é calculado a partir da divisão entre f e Y_l , $\text{sen}\theta = \frac{f}{Y_l}$.

$$\theta = \arcsen\left(\frac{0,05}{35}\right) \Leftrightarrow \theta = \arcsen(1,42857 \times 10^{-2}) \Leftrightarrow \theta = (8,185 \times 10^{-2})^\circ$$

Se considerarmos o ponto P a origem em relação aos eixos X e Y, P encontra-se inicialmente na posição $\vec{P}_{ini} = Y_c \vec{e}_x + Y_l \vec{e}_y \Leftrightarrow \vec{P}_{ini} = 74,2 \vec{e}_x + (-35) \vec{e}_y$ [mm].

As coordenadas do ponto P na situação de rotação máxima são:

$$\begin{aligned} \vec{P}_{fin}(\vec{P}_x; \vec{P}_y) &= (f + Y_c \cos \theta) \vec{e}_x + (Y_l \cos \theta + Y_c \sin \theta) \vec{e}_y \Leftrightarrow \vec{P}_{fin}(\vec{P}_x; \vec{P}_y) = \\ &= (0,05 + 74,2 \cdot \cos(8,185 \times 10^{-2})) \vec{e}_x + ((-35) \cdot \cos(8,185 \times 10^{-2}) + 74,2 \cdot \sin(8,185 \times 10^{-2})) \vec{e}_y \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \vec{P}_{fin}(\vec{P}_x; \vec{P}_y) = (0,05 + 74,20) \vec{e}_x + ((-35,00) + 0,106) \vec{e}_y \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \vec{P}_{fin}(\vec{P}_x; \vec{P}_y) = (74,25) \vec{e}_x + (-34,894) \vec{e}_y \text{ [mm]} \end{aligned}$$

Se for utilizado um raciocínio análogo para o ponto de contacto PC – o comprimento de PC acresce 150 mm do comprimento de Y_c –teremos:

$$\begin{aligned} \vec{P}_{C_{fin}}(\vec{P}_{C_x}; \vec{P}_{C_y}) &= (f + (Y_c + 150) \cos \theta) \vec{e}_x + (Y_l \cos \theta + (Y_c + 150) \sin \theta) \vec{e}_y \Leftrightarrow \vec{P}_{C_{fin}}(\vec{P}_{C_x}; \vec{P}_{C_y}) = \\ &= (0,05 + 224,2 \cdot \cos(8,185 \times 10^{-2})) \vec{e}_x + ((-35) \cdot \cos(8,185 \times 10^{-2}) + 224,2 \cdot \sin(8,185 \times 10^{-2})) \vec{e}_y \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \vec{P}_{C_{fin}}(\vec{P}_{C_x}; \vec{P}_{C_y}) = (0,05 + 224,20) \vec{e}_x + ((-35,00) + 0,32) \vec{e}_y \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \vec{P}_{C_{fin}}(\vec{P}_{C_x}; \vec{P}_{C_y}) = (74,25) \vec{e}_x + (-34,68) \vec{e}_y \text{ [mm]} \end{aligned}$$

Logo, o desvio máximo do ponto de contacto em relação ao eixo Y terá um máximo teórico de $\pm (0,32 \text{ mm})$.

III.3 Adequação da engrenagem do sistema de tracção do eixo Z

As especificações e os cálculos técnicos apresentados pelo fabricante (ver catálogo (R)) do pinhão em questão estão direccionados para situações em que são acoplados motores de velocidade moderada ou alta ao pinhão, nos quais os efeitos dinâmicos gerados pelo ruído são relevantes. No entanto, com algumas aproximações, sobrevalorizando os valores dos parâmetros críticos apresentados nos referidos cálculos técnicos, pode-se fazer uma estimativa sobrevalorizada da viabilidade da utilização do pinhão pretendido. No referido catálogo é exposta uma situação associada ao deslocamento de um pinhão na direcção vertical ao longo de uma cremalheira, a qual é análoga à configuração pretendida para o sistema de tracção do eixo Z. É

considerado que o pinhão é adequado ao sistema pretendido, se o seu valor do momento de força (ou binário) máximo permitido (M_{perm}) for maior que o valor do momento de força máximo (M_{ap}) – momento de força máximo aplicado durante o período inicial de aceleração do pinhão – necessário para o pinhão se deslocar à velocidade e aceleração desejadas, suportando a carga necessária acoplada ao referido pinhão. O valor do momento de força máximo permitido pelo pinhão (M_{perm}) tem em consideração 3 parâmetros (factor de carga (K_A), coeficiente de segurança (S) e factor de tempo de vida (f_n)) aplicados sobre o valor momento de força máximo tolerado pelo pinhão (M_{tab}) apresentado pelo fabricante na tabela de especificações do referido

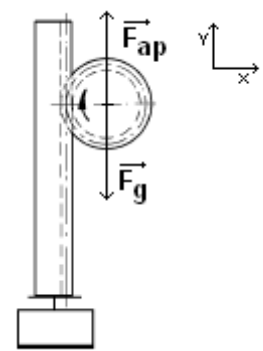


Figura III.4 - Diagrama de corpo livre do pinhão engrenado na cremalheira

elemento. O cálculo do seu valor é feito através da seguinte fórmula $M_{perm} = \frac{M_{tab}}{K_A \cdot S \cdot f_n}$.

O valor do momento de força máximo (M_{ap}) é calculado pelo produto entre a força (F_{ap}) aplicada sobre o pinhão no eixo vertical (na direcção do movimento translacional do pinhão) e o diâmetro primitivo do pinhão (d). O cálculo do seu valor é determinado a partir da seguinte fórmula $M_{ap} = F_{ap} \cdot d$. A força aplicada é calculada a partir do diagrama de corpo livre apresentado na figura ... em relação ao eixo Y:

$$F_{resultante} = F_{ap} - F_g \Leftrightarrow M_{total} \cdot a_{total} = F_{ap} - (M_{total} \cdot a_g) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F_{ap} = (M_{total} \cdot a_{total}) + (M_{total} \cdot a_g),$$

sendo: $F_{resultante}$ a força resultante do diagrama de corpo livre no eixo Y; M_{total} a massa do pinhão e da unidade de contacto suportada pelo primeiro; a_{total} a aceleração linear pretendida para o conjunto “pinhão + unidade de contacto”; a_g a aceleração gravítica.

Assim sendo, o valor do momento de força máximo (M_{ap}) é dado por

$$M_{ap} = [M_{total} \cdot (a_{total} + a_g)] \cdot d$$

Para se determinar os valores de M_{perm} e M_{ap} é necessário determinar os valores dos diferentes parâmetros incluídos nas fórmulas anteriormente expostas.

Em relação à fórmula de cálculo do valor de M_{perm} :

- O facto de carga K_A encontra-se tabelado no catálogo dos elementos em questão. Esta relaciona o impacto associado à tracção com o tipo de carga a ser conduzida. Considera-se o valor mais elevado associado à tracção devido ao carácter discreto do movimento do pinhão e também que o tipo de carga a ser conduzida seria uniforme devido ao peso constante da unidade de contacto. Assim sendo, o valor de K_A é 1,50.

- O coeficiente de segurança S deve ter um valor em 1,1 e 1,4, segundo o catálogo. Opta-se pelo valor mais elevado por se considerar que a possível sobrevalorização deste valor é preferível a uma possível subvalorização do mesmo.

- O factor de tempo de vida f_n relaciona a velocidade linear de tracção com a lubrificação e com a razão entre a largura dos dentes do pinhão e a distância a que este último se encontra das chumaceiras que o suportam. A velocidade linear de tracção seleccionada é de 500 mm.s^{-1} por ser muito superior que a velocidade máxima linear do pinhão e por ser o menor valor apresentado na tabela. A lubrificação é efectuada diariamente. A razão entre a largura dos dentes do pinhão e a distância a que este último se encontra das chumaceiras que o suportam é considerada que seja duas vezes a largura dos dentes do pinhão, por ser preferível haver uma sobrevalorização deste valor do que uma subvalorização do mesmo. Assim sendo, f_n tem o valor de 1,15.

- O valor momento de força máximo tolerado pelo pinhão (M_{tab}) apresentado pelo fabricante na tabela de especificações do referido elemento é de 0,4488 N.m se for em aço C45 (suave).

Em relação à fórmula de cálculo do valor de M_{ap} :

- A massa total (pinhão + unidade de contacto) M_{total} é considerada que seja de 1 Kg, por ser um valor relativamente superior ao que se pretende para a unidade de contacto

- A aceleração do total (do sistema pinhão + unidade de contacto) a_t é determinada pelo quociente entre velocidade linear máxima do pinhão e o tempo de aceleração. A velocidade linear máxima considera-se que seja $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ e o tempo de aceleração 0,25 s (ambos os valores são considerados como sobrevalorizados, pelas razões referidas anteriormente). Assim sendo, a aceleração total é de $0,4 \text{ m.s}^{-2}$.

- A aceleração da gravidade ag apresenta o valor de $9,8 \text{ m.s}^{-2}$.
- o diâmetro primitivo do pinhão é de 12 mm.

Aplicando os valores dos parâmetros às fórmulas pretendidas:

$$M_{\text{perm}} = \frac{M_{\text{tab}}}{K_A \cdot S \cdot f_n} = \frac{0,4488 \text{ N.m}}{1,50 \cdot 1,4 \cdot 1,15} = 0,186 \text{ N.m} = 1,86 \times 10^{-1} \text{ N.m}$$

$$M_{\text{ap}} = [1,0 \text{ Kg} \cdot (0,40 \text{ m.s}^{-2} + 9,8 \text{ m.s}^{-2})] \cdot 0,012 \text{ m} = 0,122 \text{ Kg.m.s}^{-2} = 1,22 \times 10^{-1} \text{ N.m}$$

Dos cálculos, pode-se concluir que M_{perm} é maior que M_{ap} , logo, o pinhão é adequado para a aplicação pretendida.

III.4 Estabilidade dos veios do sistema de guiamento do eixo Z

Apesar do teste qualitativo apresentado em III.1, é necessário verificar analiticamente se os veios estão bem dimensionados. Estes apresentam 12 mm de diâmetro e 1000 mm de altura. Considerando um veio como uma coluna de base circular, através da fórmula de Euler para a flexão de colunas (encurvadura) (R), pode-se calcular a sua estabilidade, ou seja, resistência à flexão. O material utilizado é aço C45 (norma DIN 1013) n.º 1.0503 com módulo de elasticidade de 650 MPa e tensão de cedência de 340 MPa.

A fórmula de Euler calcula a força crítica de estabilidade de uma coluna, ou seja, o valor máximo de força axial aplicada sobre o topo da coluna que esta suporta, mantendo a sua estabilidade estrutural. A sua expressão matemática é: $F_{\text{cr}} = \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2}$, sendo C uma constante

associada às condições de fixação da coluna, E o módulo de elasticidade da coluna, I o momento de inércia da área de secção da coluna e L o comprimento da coluna. Os cálculos, segundo a fórmula de Euler, pressupõem que a coluna falhe perante uma situação de instabilidade elástica, ou seja, que esta se comporte como uma “coluna longa”. A definição de coluna longa baseia-se no conceito de coeficiente de esbelteza, representado pela letra grega λ . Este é calculado pela razão entre o comprimento da coluna (representado por L) e o raio de giração da mesma (raio da área de secção da coluna, em torno do eixo axial de rotação), representado por r. O raio de giração é calculado a partir da raiz quadrada da razão entre o momento de inércia da coluna (I) e a área de secção da

coluna (A). Ou seja, $\lambda = \frac{L}{r}$ e $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$. Continuando a definição de coluna longa, se o coeficiente de esbelteza da coluna em estudo (λ), for maior que o coeficiente de esbelteza crítico (λ_{cr}), calculado quando a razão entre o valor da força axial crítica aplicada sobre a coluna (F_{cr}) e a sua área de secção (representado por A) for igual a metade da tensão de cedência característica do material que

constitui a coluna (representado por T_c), ou seja, λ_{cr} quando $\frac{F_{cr}}{A} = \frac{T_c}{2}$ (R). Partindo da fórmula de Euler e aplicando as diferentes fórmulas apresentadas, pode-se deduzir a fórmula de λ_{cr} :

$$\begin{aligned} F_{cr} &= \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \Leftrightarrow F_{cr} = \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E \cdot (r^2 \cdot A)}{L^2} \Leftrightarrow \frac{F_{cr}}{A} = \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{T_c}{2} = \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \Leftrightarrow \lambda_{cr}^2 = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot E}{T_c} \Leftrightarrow \lambda_{cr} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot E}{T_c}} \end{aligned}$$

Para o veio, L é igual a 1,000 m, E é igual a 200 GPa (2×10^{11} N.m⁻²). T_c é igual a 345 MPa ($3,45 \times 10^8$ N.m⁻²). C é 4 teoricamente, pois ambas as extremidades da cremalheira estarão bem fixas, mas seguindo a recomendação de Shingley (R), na prática o valor de C recomendado para as condições das extremidades desta coluna é de 1,2 ou mesmo de 1 numa perspectiva conservativa, daí usar-se o valor 1. I é obtido a partir da expressão (considerando o veio como uma coluna cilíndrica com 0,012 m de diâmetro:

$$\begin{aligned} I &= \frac{d^4 \cdot \pi}{64} \Leftrightarrow I = \frac{(1,2 \cdot 10^{-2} \text{ m})^4 \cdot \pi}{64} \Leftrightarrow I = \frac{2,074 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \cdot 3,14}{64} \Leftrightarrow I = \frac{6,512 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{64} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow I = 1,02 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

A partir do valor do momento de inércia da área de secção da coluna, calcula-se o raio de giração, para se poder determinar o coeficiente de esbelteza da cremalheira:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\frac{I}{A}} \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{I}{0,25 \cdot d^2 \cdot \pi}} \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{1,02 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4}{0,25 \cdot (1,20 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2 \cdot \pi}} \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{1,02 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4}{0,25 \cdot 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 3,14}} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{1,02 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4}{1,13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}} \Leftrightarrow r = \sqrt{9,027 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \Leftrightarrow r = 3,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Aplicando os valores do comprimento e do raio de giração da cremalheira, calcula-se o coeficiente de esbelteza da cremalheira.

$$\lambda = \frac{L}{r} = \frac{1,000 \text{ m}}{3,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \Leftrightarrow \lambda = 3,333 \cdot 10^2$$

Para se poder verificar que a cremalheira comporta-se como uma coluna longa, é necessário calcular o coeficiente de esbelteza crítico, para uma posterior comparação com o coeficiente de esbelteza da cremalheira:

$$\lambda_{cr} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot E}{T_c}} \Leftrightarrow \lambda_{cr} = \sqrt{\frac{2 \cdot (3,14)^2 \cdot 1 \cdot (2,05 \cdot 10^{11} \text{ N.m}^{-2})}{3,45 \cdot 10^8 \text{ N.m}^{-2}}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \lambda_{cr} = \sqrt{\frac{4,042 \cdot 10^{12} \text{ N.m}^{-2}}{3,45 \cdot 10^8 \text{ N.m}^{-2}}} \Leftrightarrow \lambda_{cr} = \sqrt{1,172 \cdot 10^4} \Leftrightarrow \lambda_{cr} = 1,083 \cdot 10^2$$

Como $\lambda > \lambda_{cr}$, pode-se considerar que a cremalheira comporta-se como uma coluna longa, podendo aplicar-se a fórmula de Euler no cálculo do valor máximo de força axial aplicada sobre o topo da coluna que esta suporta, mantendo a sua estabilidade estrutural. Logo,

$$F_{cr} = \frac{1 \cdot (3,14)^2 \cdot 2,05 \cdot 10^{11} \text{ N.m}^{-2} \cdot 1,02 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4}{(1,000 \text{ m})^2} \Leftrightarrow F_{cr} = \frac{2,062 \cdot 10^4 \text{ N.m}^2}{1,000 \text{ m}^2} \Leftrightarrow F_{cr} = 2,06 \cdot 10^4 \text{ N}$$

A força crítica calculada corresponde à força de gravidade exercida sobre uma massa com cerca de 2000 kg. Este valor ultrapassa em larga escala qualquer carga aplicada verticalmente sobre o centro dos veios, logo, o diâmetro dos veios é aceitável

APÊNDICE IV Elementos associados aos sistemas da unidade de contacto

IV.1 Sistemas de tracção

Os sistemas de tracção estão associados a elementos que induzem movimento através da transmissão de potência de uns para outros. A fonte de energia pode ser diversificada (eléctrica, química, mecânica, etc.) sendo sempre convertida em energia mecânica. O movimento associado a estes elementos pode ser translaccional (rectilíneo) ou rotacional, permitindo quatro cenários possíveis de transmissão de movimento entre elementos: a) translaccional / rotacional; b) translaccional / translaccional (com apoio de um terceiro elemento); c) rotacional / translaccional; d) rotacional – rotacional. O movimento associado às unidades de contacto é translaccional rectilíneo (sistema cartesiano), daí serem mais relevantes elementos que providenciem movimento rotacional / translaccional e translaccional / translaccional, apesar de se poder conceber mecanismos com mais de dois elementos e, consequentemente, uma sequência de transmissão mais complexa que as opções apresentadas. Os elementos e órgãos mecânicos existentes associados à transmissão de movimento são engrenagens, rodas de atrito, fusos, correntes e correias.

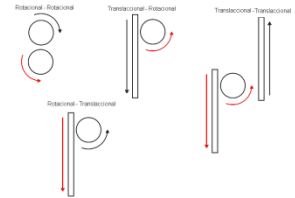


Figura IV.1- Transmissão de movimento

Nos sistemas de tracção, o controlo do movimento é feito por um outro sistema que aplique força (tracção) num dos elementos do sistema de tracção. Essa força é aplicada por mecanismos que transformam uma forma de energia em energia mecânica. Tipicamente são utilizados motores ou é aplicada força muscular por parte do utilizador. Para este último caso, usam-se manípulos e manivelas. Os elementos e órgãos mecânicos existentes associados à transmissão de movimento são engrenagens, rodas de atrito, fusos, correntes e correias.

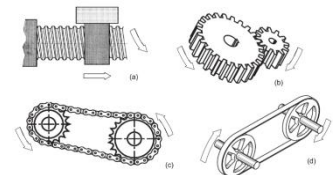


Figura IV.2 – Mecanismos de tracção

Os conceitos mais adequados para os sistemas de tracção da unidade de contacto são os que transformam movimento rotacional ou translaccional em movimento translaccional, visto a concepção do instrumento basear-se num sistema cartesiano de coordenadas.

IV.2 Sistemas de guiamento

Os sistemas de guiamento direccionam elementos mecânicos, condicionando a sua liberdade de movimento às direcções ou trajectórias pretendidas. Ou seja, são concebidos de forma a reduzir o número de graus de liberdade de um elemento, através da aplicação de restrições de movimento. Estes sistemas têm elementos que, pela sua forma geométrica e pelas propriedades dos materiais que os constituem, criam resistência ao movimento muito elevada nas direcções não pretendidas e

diminuem ao máximo (coeficiente de atrito menor possível) a resistência nas direcções em que se pretende que os elementos ou sistemas mecânicos se desloquem. A redução desta resistência está associada a características tribológicas, controladas pelas propriedades lubrificantes dos materiais que constituem a superfície dos elementos de guiamento ou pela adição de lubrificantes entre os diferentes elementos de guiamento.

De certa forma, a estrutura unitária de um sistema de guiamento pode ser definida por um elemento externo que contém, parcial ou totalmente, um elemento interno. Uma configuração típica é o sistema veio – furo, no qual uma peça com um furo incorpora

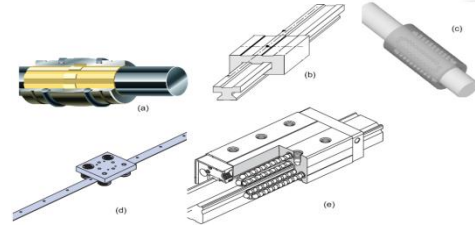


Figura IV.3 – Mecanismos de guiamento

dentro deste um elemento alongado que se desloca ao longo desta. Numa perspectiva paralela, também é comum que um dos elementos sirva de suporte (componente estática) ao outro elemento que se desloca axial, radial ou translacionalmente (componente dinâmica). Os elementos externos são tipicamente apoios ou chumaceiras. Estes contactam os elementos internos através de elementos de: (a) rolamento (esferas, rolos, agulhas, rodas), baseado em princípios de atrito por rolamento; (b) deslizamento (casquilhos), baseado em princípios de atrito por escorregamento. As opções geométricas existentes para as diferentes chumaceiras são variadas como, por exemplo, a configuração de guia cilíndrica (aberto ou fechado), guia trapezoidal, guia triangular ou guia paralela.

IV.3 Sistema de travagem

O sistema de travagem, quando accionado, tem como objectivo imobilizar a componente dinâmica do sistema de guiamento, assegurando a manutenção da sua posição estática. Se esta componente estiver em movimento, a imobilização inclui a redução da sua velocidade até 0 m.s^{-1} .

A imobilização implica a criação de resistência ao movimento nas direcções em que este é permitido pelo sistema de guiamento. Essa resistência é gerada: (a) pela colocação de um elemento que bloqueie a passagem da componente dinâmica do sistema de guiamento elemento dinâmico; ou (b) por

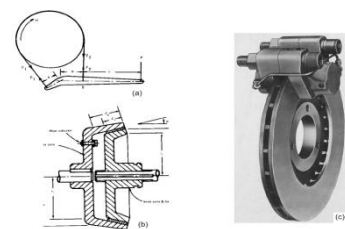


Figura IV.4 - Mecanismos de travagem

um mecanismo que estabeleça o contacto entre as componentes estática e dinâmica do sistema de guiamento gerando uma fonte de atrito. Durante este processo, a energia mecânica do contacto é tipicamente transformada em energia térmica.

Associado ao sistema de travagem, há também o controlo do seu accionamento, manual ou automático, através da aplicação de força sobre o elemento do sistema de travagem que induz a

imobilização do elemento dinâmico do sistema de guiamento. Essa força pode ser muscular (pelo utilizador), mecânica, hidráulica, eléctrica, etc.

IV.4 Sistema de medição

A determinação das coordenadas de cada ponto marcado implica a medição da sua posição relativamente a um referencial. Quando é utilizado um referencial cartesiano, o ponto marcado pode ser definido por um sistema de medição que determine, relativamente a cada um dos três eixos (X, Y e Z), a distância compreendida entre a origem do referencial e a projecção desse ponto em cada um dos três eixos, correspondendo cada distância à coordenada do ponto no respectivo eixo.

Um sistema de medição tem como objectivo a quantificação de uma grandeza física, por comparação com uma referência predefinida. Neste caso, a grandeza física é o comprimento. Este é definido pela distância entre a posição de um elemento genérico em relativamente a um ponto de referência ou pelo valor do deslocamento desse elemento ao longo de uma escala de referência. O sistema de medição tem de ter para cada coordenada: um padrão de referência, com um conjunto de valores bem definidos (como uma escala graduada) associado à mesuranda (grandeza física a medir; a definição do(s) ponto(s) de referência do(s) qual(is) se pretende avaliar a sua posição e, caso haja, a respectiva variação; a exposição e registo dessa quantificação. Estas características podem ser incluídas numa única componente, mas todas têm de estar presentes.

A componente principal a seleccionar é o padrão de referência. Associado à grandeza comprimento existem dois grandes grupos de instrumentos. Os primeiros são instrumentos mais clássicos, tipicamente mecânicos e de contacto. Os mais comuns são a régua graduada, a craveira com nónio e o micrómetro, com precisões até 0,5 mm, 0,1 mm a 0,02 mm e 0,01 mm, respectivamente. Existem ainda os blocos padrão, com uma precisão de fabrico até 0,001 mm e capacidade de representação de diferentes comprimentos. Os segundos são instrumentos que utilizam técnicas ópticas, acústicas ou electromecânicas como a interferometria e a difracção, o tempo de voo acústico ou os LVDTs. Têm capacidade para apresentar uma precisão maior que o grupo anterior, mas a sua utilização é mais complexa e exigente em termos de condições ambiente, cálculos e componentes dos instrumentos.

APÊNDICE V – Pedido de Patente (Junho de 2008)

O pedido de patente n.º 103990 foi registado em nome de Cláudia Quaresma, Mário Forjaz Secca e Filipe Santos.

V.1 Desenho do Protótipo fabricado (segundo o pedido de patente submetido)

O desenho, desenvolvido durante o processo de concepção, foi utilizado para o fabrico e montagem do protótipo. Este desenho também foi submetido a um pedido de patente para protecção da propriedade intelectual associada à concepção do instrumento. Consequentemente, o desenho e respectiva descrição que se consideram mais adequados a serem exposto nesta tese de dissertação são os submetidos para o pedido de patente.

V.2 – Figuras e Descrição do Instrumento (segundo o pedido de patente)

O produto, que pretendemos patentear, tem como objectivo avaliar as curvaturas e desvios laterais da coluna vertebral, na posição de pé. É um instrumento não invasivo, que permite reproduzir a posição de cada uma das apófises espinhosas das vértebras, da coluna vertebral, desde a primeira vértebra cervical até à primeira vértebra sacrada.

É composto por duas partes: uma primeira parte que designamos por corpo e uma segunda parte que definimos como o suporte.

A primeira parte é composta por uma peça vertical (que encaixa no suporte) e várias peças horizontais. A peça vertical é constituída por uma cremalheira fixa a um perfil de base quadrangular, quatro varões, uma régua graduada e ainda duas placas de suporte nos topos de todas estas estruturas, sendo que a placa inferior também permite o encaixe no suporte. A ligação entre as duas placas e a cremalheira com o perfil é feita por dois espigões e parafusos. Cada uma dessas peças horizontais tocará nas apófises espinhosas de cada uma das vértebras da coluna vertebral, desde a primeira vértebra cervical até à primeira vértebra sacrada. Esse contacto é feito através da extremidade afunilada da cremalheira horizontal e denomina-se ponto de contacto. Acoplada a esta cremalheira de cada peça horizontal do corpo do instrumento, estão dois pinhões dispostos horizontalmente, sobre uma peça com uma vareta incorporada. Esta peça está assente numa outra, que faz a ligação com a peça vertical do corpo do instrumento. Essa interface é feita através dos varões e da cremalheira com quatro furos e um pinhão respectivamente. Um parafuso recartilhado com uma chapa em U disposta horizontalmente garante a fixação da peça horizontal do corpo do instrumento na peça vertical do mesmo.

O suporte é composto por duas peças: uma base (horizontal) apoiada sobre quatro pés onde a pessoa que avaliamos coloca os pés e uma vertical, onde encaixa a peça vertical do corpo do instrumento. Esta última é constituída por um perfil de base rectangular que sustenta o corpo do instrumento e uma placa disposta horizontalmente com quatro furos permitindo a fixação entre o corpo e o suporte do instrumento.

O presente produto a patentear vai agora ser explicado com mais pormenor com o auxílio dos desenhos anexos, nos quais:

- a fig. 1 tem duas vistas (a e b) de todo o instrumento. Estão representados o alçado principal (a) e no alçado lateral esquerdo (b). Em ambos é realçado o corpo (1) e o suporte do instrumento (2), apresentando-se também a peça vertical (3) e as peças horizontais (4) do corpo instrumento. No alçado lateral esquerdo (b) são realçados os pontos de contacto (5) entre o instrumento e a pessoa a ser avaliada, através das suas peças horizontais (4).

- a fig. 2 tem uma vista complementar às duas anteriores da fig.1, relativamente a todo o instrumento. Nesta é apresentada a vista superior do instrumento com realce para as suas peças horizontais (4) e respectivos pontos de contacto (5).

- a fig. 3 tem duas vistas do suporte do instrumento com identificação das peças horizontal (6) e vertical (7);

- a fig. 4 tem três vistas da peça vertical (3) do corpo do instrumento. Na vista superior estão representados os cortes que são apresentados nas outras vistas. Tanto o alçado principal (a) como o alçado lateral esquerdo (b) são vistas interrompidas. No corte B-B (b) estão representados com mais clareza a cremalheira vertical (21) acoplada ao perfil de base quadrangular (22) e a fixação desta nas duas placas de suporte (15, 16) através dos dois espigões (17) inseridos no perfil (22). No corte A-A (a) estão representados com mais clareza os varões (13) e a sua fixação e ainda outra vista do perfil (22) com os espigões de fixação (17).

- a fig. 5 apresenta um pormenor do instrumento, relativamente às suas peças horizontais (4), à régua graduada (14) pertencente à peça vertical (3) do seu corpo (1) e à interface entre o seu corpo (1) e o seu suporte (2).

- a fig. 6 apresenta a vista superior de uma peça (44) da peça horizontal (4) do corpo (2) do instrumento;

- a fig. 7 apresenta três vistas de uma peça (39) da peça horizontal (4) do corpo da vértebra.

Fazendo referência aos desenhos, na figura 1 é apresentado o instrumento com identificação das suas duas peças principais (1 e 2) e do ponto de contacto entre o instrumento e a pessoa que avaliamos (5). Estes postos são identificados, de novo, na figura 2 com uma terceira vista do instrumento. Na figura 3 é apresentada a peça 2 da figura 1 dividida nas peças 6 e 7. É na peça 6 que a pessoa, que é avaliada, coloca os pés. Esta está apoiada em quatro peças 11, cada uma com rosca macho na sua extremidade superior e ligada pela respectiva porca 10 que está fixa na face inferior da peça 6. A interface e o suporte da peça 1 sobre a peça 2 são feitos pela peça 7 através da peça 9 e do perfil 8 respectivamente. A peça 9 tem quatro furos (12) com rosca fêmea, responsáveis pela referida fixação.

A peça 1 da figura 1 é constituída pela peça 4 e pela peça 3 da figura 1. Esta última está representada na figura 4. É constituída por quatro peças 13, pelas peças 14, 15, 16 e ainda pela cremalheira 21 e pelo perfil 22. Estas duas últimas estão furadas em cinco pontos, sendo fixas uma à outra por parafusos enroscados em porcas cravadas no perfil 22.

Cada peça 13 tem um furo roscado fêmea em cada face superior e inferior, no qual vai ser inserido um parafuso que passa pelas peças 15 e 16, formando parte da estrutura da peça 3.

As duas peças 17, que estão inseridas no perfil 22 posicionando-o, têm um furo roscado, tal como as peças 13. Todas elas estão fixas às duas peças 15 e 16 por parafusos. Essas duas últimas peças têm vários furos com caixas representados em 18, 19 e 20 da figura 4.

Os furos 20 das peças 15 e 16 são mais largos relativamente que os furos 18 e 19 e têm uma caixa elíptica para a cabeça do parafuso de forma a permitir o ajuste da posição da peça 14. Os furos 20 encontram-se na peça 15 com a caixa na face inferior e na peça 16 com a caixa na face superior.

Os furos 19 têm a tolerância típica para a passagem dos parafusos utilizados. Cada um dos furos 19 tem duas caixas: uma para a cabeça do parafuso e outra para a extremidade da peça 13. Na peça 15, a caixa para a cabeça dos parafusos está na face inferior e a caixa para a extremidade de cada peça 13 na face superior. Na peça 16 é o inverso, estando a caixa para a cabeça dos parafusos na face superior e a caixa para a extremidade de cada peça 13 na face inferior

Os furos 18 existem apenas na peça 15, pois fazem a interface de fixação entre o corpo (1) e o suporte (2) do instrumento, em conjunto com os furos 12 da peça 9 da figura 3. Esta última peça recebe os parafusos que passam pela peça 15. Nesta última peça, a caixa para cada parafuso encontra-se na sua face superior.

A peça 4 da figura 1 está representada nas figuras 5 e 6. Nesta figura estão representados os pinhões 24 e a cremalheira 23. Esta última assume uma forma afunilada na extremidade, sendo esse o ponto de contacto (5) com a pessoa a ser avaliada. O movimento é accionado pelos pinhões 24 e a posição da cremalheira 23 determina uma das coordenadas da posição do ponto que se pretende determinar, através da distância desde a extremidade afunilada (5) até cada uma das peças horizontais (4) do corpo do instrumento. Os pinhões 24 e a cremalheira 23 são suportados pela peça 25 e estão fixas superiormente pela chapa 26 e por dois parafusos embutidos nesta. Estes últimos estão inseridos em dois furos roscados verticais, passando pelo eixo rotacional dos pinhões 24 e ao longo de um pequeno tubo vertical (27) que mantém a posição destes. A cremalheira 23 para além de estar condicionada pelos pinhões (24) e pela chapa 26, também está condicionada por uma parede (28) da peça 25, permitindo que a primeira (23) só faça movimentos na direcção da tracção imposta pelos pinhões 24. A peça 25 está representada na figura 8. Esta peça encontra-se assente na peça 29, que é representada na figura 7, e tem um furo (30), perpendicularmente ao seu comprimento, sendo que o terço central é roscado. Ao longo desse furo passa uma vareta roscada (32) prisioneira na peça 29, passando ao longo dos furos 37 e 38 e estando fixa na extremidade mais medial por uma porca cega e uma anilha e na extremidade mais lateral por um sistema porca/contraporca com anilha. Nessa extremidade ainda tem um pequeno manípulo (33) fixo à vareta. A rotação do manípulo promove o movimento rotacional da vareta roscada 32 que, estando fixa nas suas extremidades, leva ao movimento da peça 25. Esta peça está limitada lateralmente pelos dois perfis 34 em L, os quais se encaixam em duas zonas da peça 25 que são rebaixadas (35) e mantêm a posição desta peça nas direcções normais ao eixo de rotação da vareta roscada. Estes perfis estão fixos à peça 29 por quatro parafusos com as suas cabeças embutidas nos perfis em L, tendo a peça 29 quatro furos roscados (39). O perfil em L mais distante da posição onde a pessoa avaliada se encontra tem uma escala que permite definir a posição da peça 25, que por sua vez permite determinar uma outra coordenada da posição do ponto que se pretende definir. Por fim, a terceira coordenada é obtida pela medição da posição da peça 4 na peça 14 da peça 3, representada na figura 5. O movimento da peça 4 sobre a peça 3 é feito pela passagem da peça 29 ao longo das peças 13 da figura 4 através dos furos 36 da figura 7 e pelo rolamento do pinhão 40 da figura 6 sobre a cremalheira 21 e ao longo da caixa 41 da figura 7. Este pinhão encontra-se numa vareta roscada (42), inserida no furo 43 da peça 29 e estando fixo por duas porcas enroscadas contra este. Ambas são rebaixadas em altura e largura de forma a não entrarem em contacto com os dentes da

cremalheira 21. Esta vareta tem numa das suas extremidades, uma porca cega e na outra uma porca recartilhada (44) fixa à uma contra-porca (uma enroscada contra a outra) fazendo de manípulo e controlando o movimento da peça 4 no eixo vertical.

. Quando enroscada no furo roscado (45) da peça 29, a pressão da peça 46, sobre a chapa 47 em forma de U na horizontal, ambas da figura 6, contra a peça 14 garante a manutenção da posição da peça 3 sobre a peça 4, ambas da figura 1.

A peça 46 é semelhante ao manípulo acima referido, sendo constituída por uma porca recartilhada enroscada numa vareta roscada e contra a contra-porca.

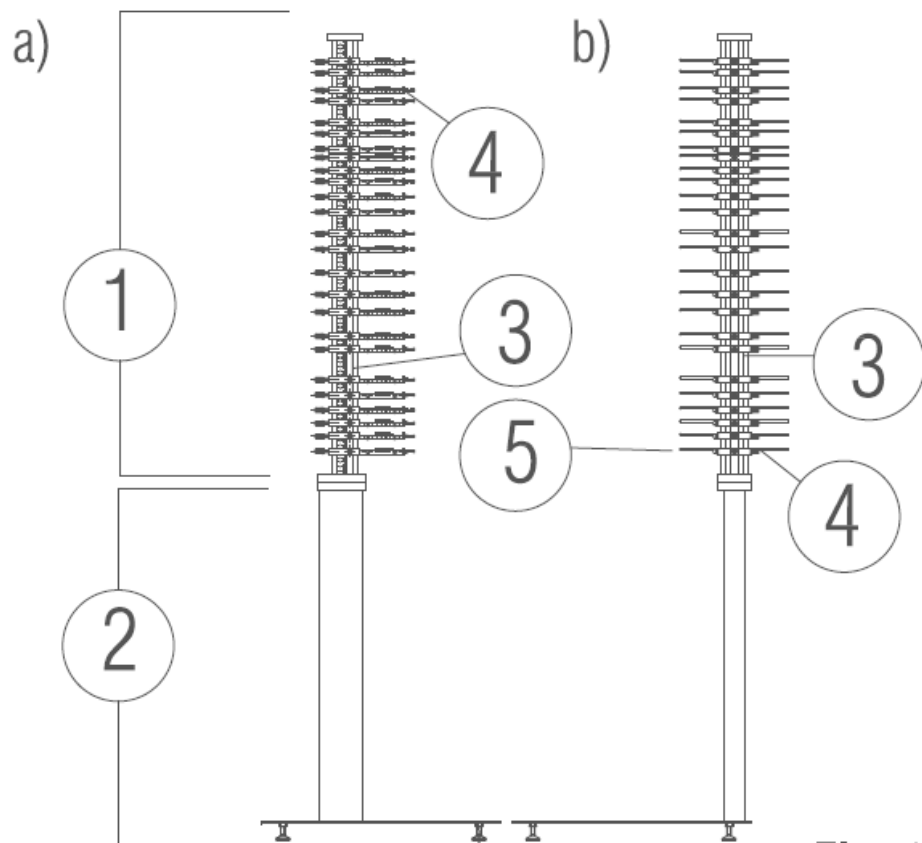


Fig. 1

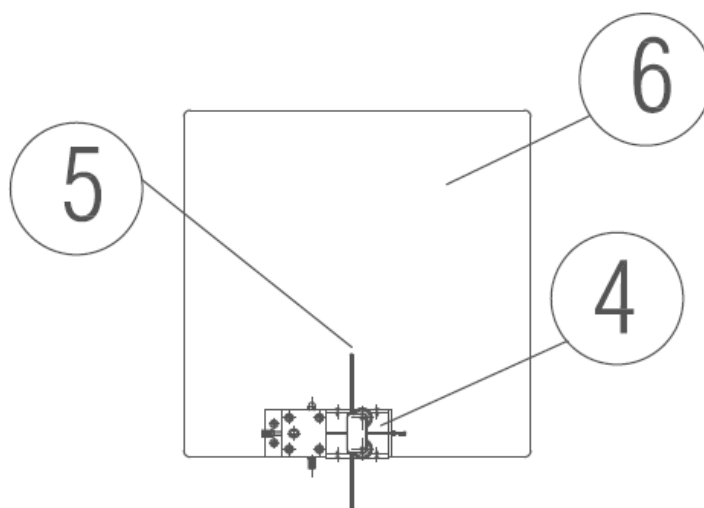


Fig. 2

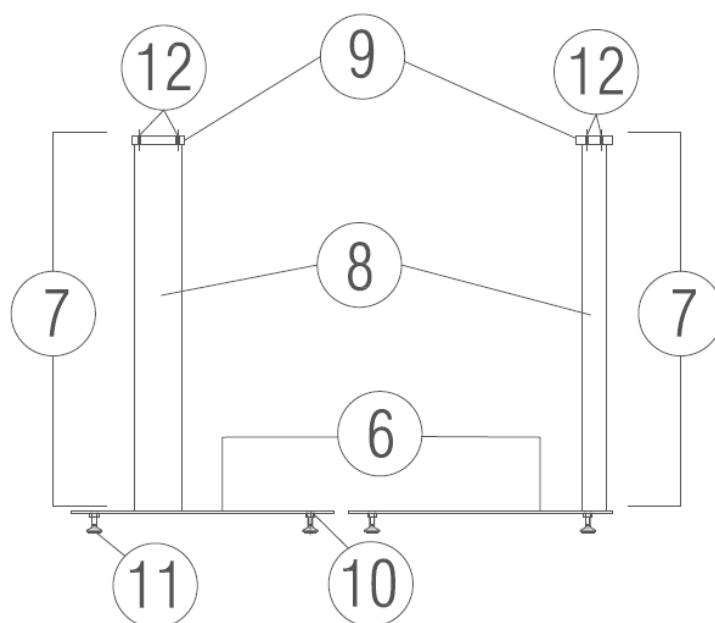
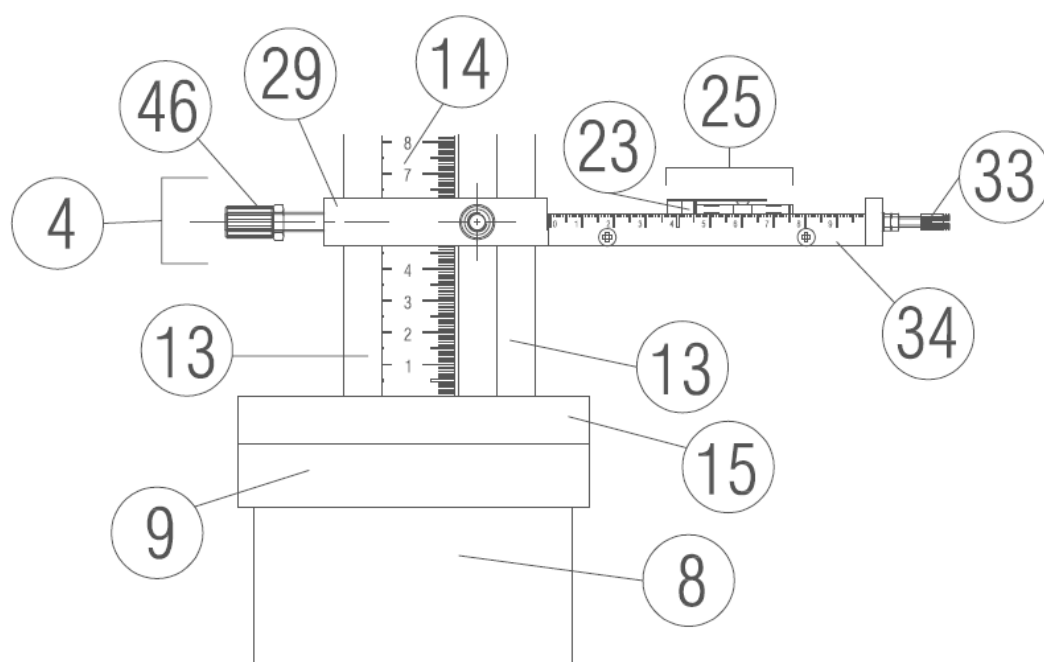
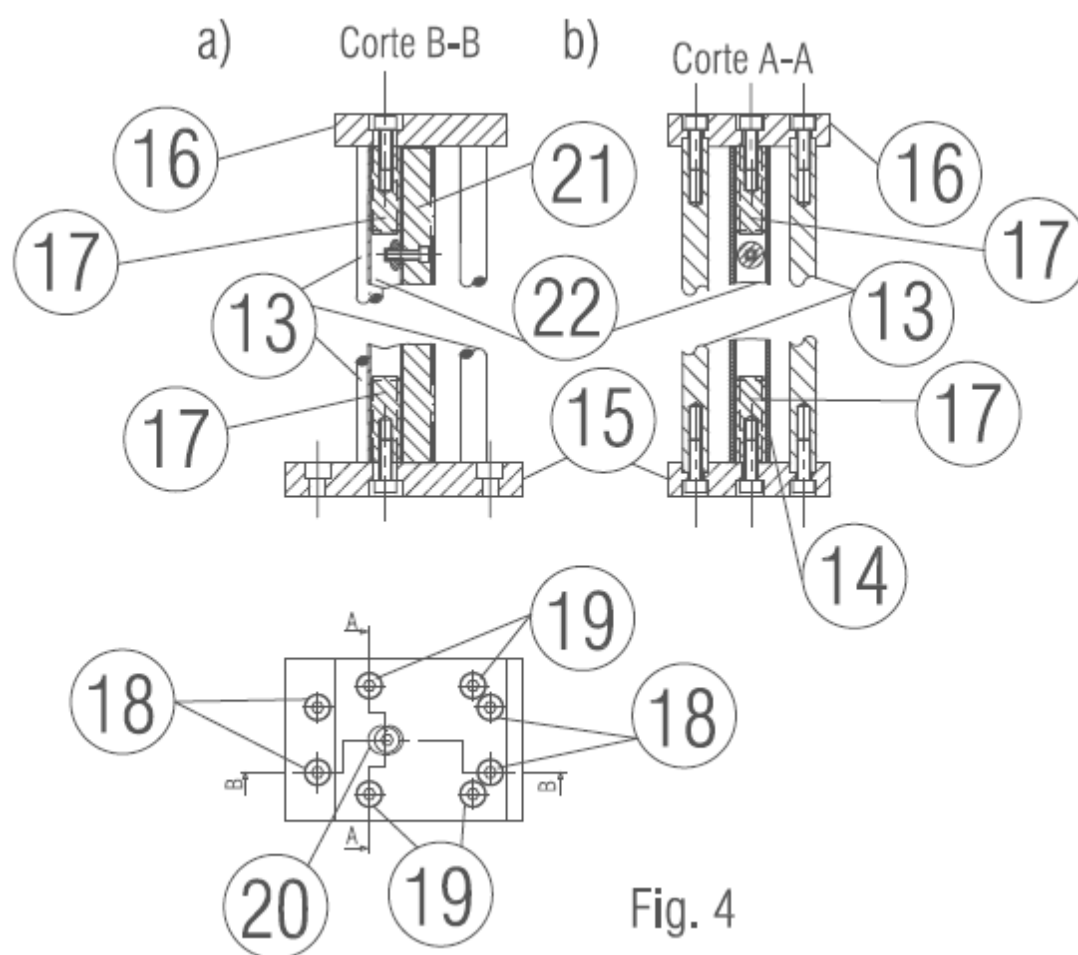


Fig. 3



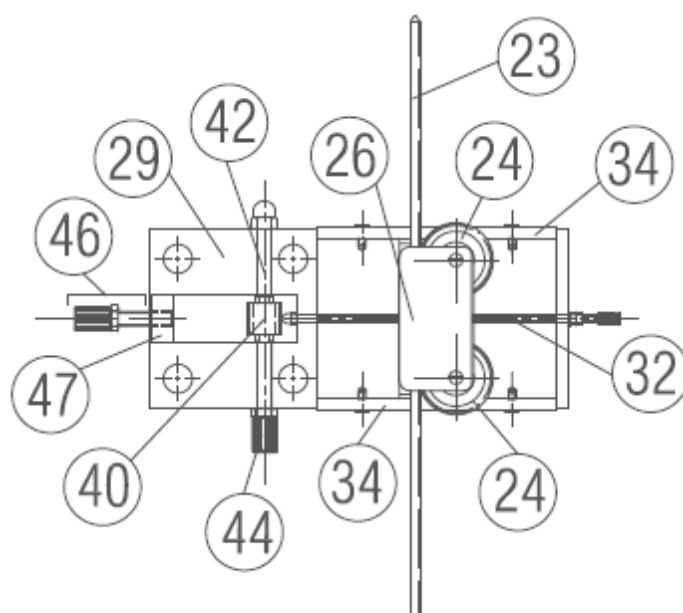


Fig. 6

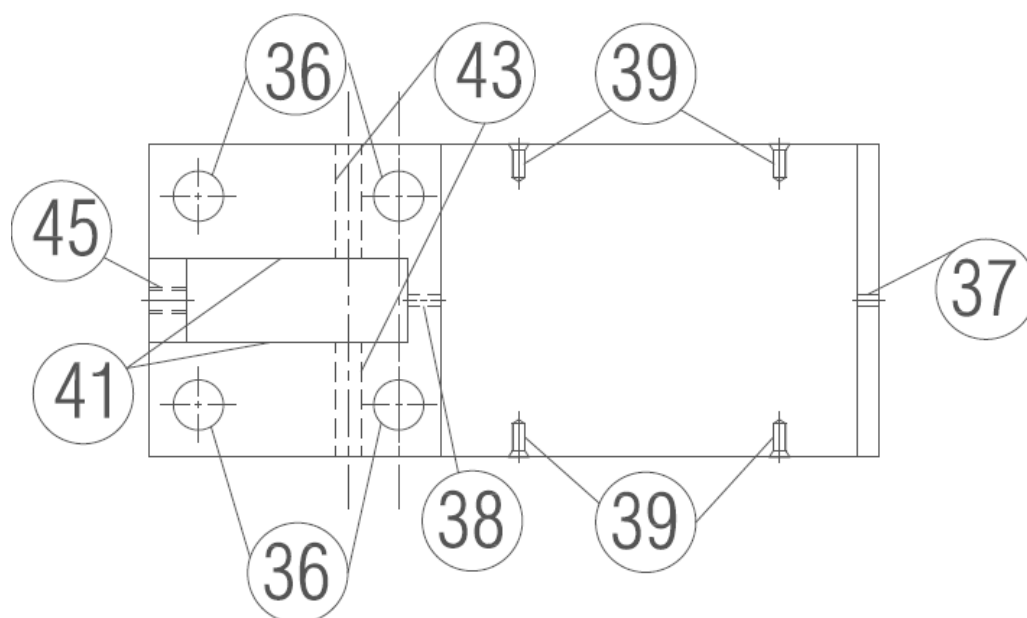


Fig.7

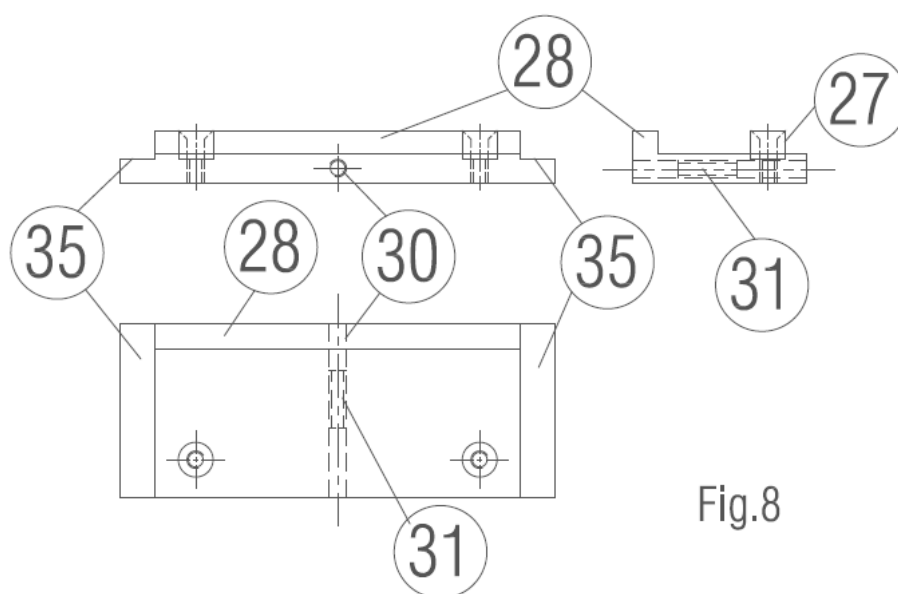


Fig.8